

(12)特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局



(43) 国際公開日  
2004 年 7 月 22 日 (22.07.2004)

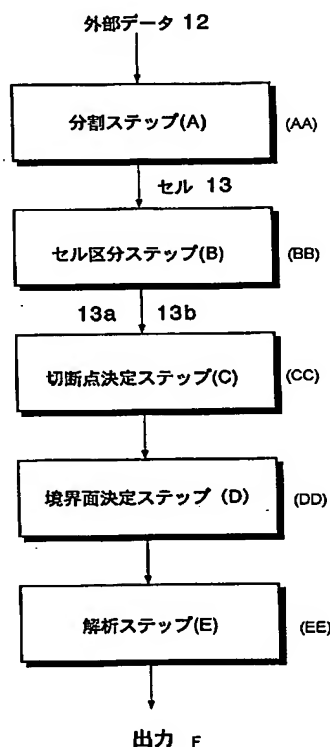
PCT

(10) 国際公開番号  
WO 2004/061723 A1

- |                                |                                  |  |
|--------------------------------|----------------------------------|--|
| (51) 国際特許分類:                   | G06F 17/50                       | (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 独立行政法人理化学研究所 (RIKEN) [JP/JP]; 〒351-0198 埼玉県 和光市広沢 2 番 1 号 Saitama (JP).  |
| (21) 国際出願番号:                   | PCT/JP2003/015971                |  |
| (22) 国際出願日:                    | 2003 年 12 月 12 日 (12.12.2003)    | (72) 発明者; および  |
| (25) 国際出願の言語:                  | 日本語                              | (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 雷 康斌 (LEI, Kangbin) [CN/JP]; 〒351-0198 埼玉県 和光市広沢 2 番 1 号 独立行政法人理化学研究所内 Saitama (JP). 岩田 正子 (IWATA, Masako) [JP/JP]; 〒351-0198 埼玉県 和光市広沢 2 番 1 号 独立行政法人理化学研究所内 Saitama (JP). 姫野 龍太郎 (HIMENO, Ryutaro) [JP/JP]; 〒351-0198 埼玉県 和光市広沢 2 番 1 号 独 |
| (26) 国際公開の言語:                  | 日本語                              |  |
| (30) 優先権データ:<br>特願 2002-379214 | 2002 年 12 月 27 日 (27.12.2002) JP |  |
- [続葉有]

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR NUMERICAL ANALYSIS OF FLOW FIELD OF NON-COMPRESSIVE VISCOUS FLUID DIRECTLY USING V-CAD DATA

(54) 発明の名称: V-CAD データを直接用いた非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法と装置



12...EXTERNAL DATA  
13...CELL  
(AA)...DIVISION STEP (A)  
(BB)...CELL GROUPING STEP (B)  
(CC)...CUT POINT DECISION STEP (C)  
(DD)...BOUNDARY DECISION STEP (D)  
(EE)...ANALYSIS STEP (E)  
F...OUTPUT

(57) Abstract: A method for numerical analysis of flow field of non-compressive viscous fluid includes: a division step (A) for dividing external data (12) consisting of boundary data on the object in contact with a non-compressive viscous fluid into a plurality of cells (13) to which the boundary is orthogonal; a cell grouping step (B) for grouping the divided cells into internal cells (13a) positioned inside the object and boundary cells (13b) including boundary data; a cut point decision step (C) for obtaining cut points of the edge line of the boundary cells (13b) by the boundary data; a boundary decision step (D) for treating a polygon obtained by connecting the cut points as boundary cell internal data; and an analysis step (E) for applying the cut cell finite volume method together with the VOF method to the boundary of the flow field.

(57) 要約: 非圧縮性粘性流体と接する対象物の境界データからなる外部データ 12 を境界が直交する複数のセル 13 に分割する分割ステップ (A) と、分割された各セルを対象物の内側に位置する内部セル 13 a と境界データを含む境界セル 13 b とに区分するセル区分ステップ (B) と、境界データによる境界セル 13 b の稜線の切断点を求める切断点決定ステップ (C) と、求めた切断点を結ぶ多角形を境界面のセル内部データとする境界面決定ステップ D と、流れ場の境界に、VOF 法を併用したカットセル有限体積法を適用して解析する解析ステップ (E) とを備える。



立行政法人理化学研究所内 Saitama (JP). 加瀬 究  
(KASE, Kiwamu) [JP/JP]; 〒351-0198 埼玉県 和光市広  
沢 2 番 1 号 独立行政法人理化学研究所内 Saitama  
(JP).

(74) 代理人: 堀田 実 (HOTTA, Minoru); 〒108-0014 東京都  
港区 芝 5 丁目 2 6 番 2 0 号 建築会館 4 階 Tokyo (JP).

(81) 指定国 (国内): JP, US.

添付公開書類:  
— 国際調査報告書

2 文字コード及び他の略語については、定期発行される  
各 PCT ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語  
のガイダンスノート」を参照。

## 明細書

V-CADデータを直接用いた非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法と装置

5

## 発明の背景

## 発明の技術分野

本発明は、形状と物理量を統合した実体データを記憶するV-CADデータを直接用いた非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法と装置に関する。

## 10 関連技術の説明

形状と物性を統合した実体データを小さい記憶容量で記憶することができ、これにより、物体の形状・構造・物性情報・履歴を一元的に管理し、設計から加工、組立、試験、評価など一連の工程に関わるデータを同じデータで管理することができ、CADとシミュレーションを一元化することできる実体データの記憶方法として、【特許文献1】が開示されている。

15

## 【特許文献1】

特開2002-230054号公報

20

【特許文献1】の「形状と物性を統合した実体データの記憶方法」は、図1に示すように、外部データ入力ステップ(A)、八分木分割ステップ(B)、及びセルデータ記憶ステップ(C)からなり、外部データ入力ステップ(A)では、外部データ取得ステップS1で取得した対象物の境界データからなる外部データ12を本発明の方法を記憶したコンピュータ等に入力し、八分木分割ステップ(B)では、外部データ12を八分木分割により境界平面が直交する直方体のセル13に分割し、セルデータ記憶ステップ(C)では、各セル毎に種々の物性値を記憶するものである。

25

上述した【特許文献1】の発明は、対象物の形状データからなる外部データを、八分木分割により境界平面が直交する直方体のセルに分割し、各セル毎に種々の物性値を記憶するものである。分割された各セルは対象物の内側に位置する内部セルと、境界面を含む境界セルとからなる。また、内部セルは、属性として1種

の物性値を持ち、境界セルは、対象物の内側と外側の2種の物性値をもつものである。

以下、この方法によるデータを「V-CADデータ」と呼び、このデータを用いた設計やシミュレーションを「ボリュームCAD」又は「V-CAD」と呼ぶ。

5 図1において14がV-CADデータである。

CFD (Computational Fluid Dynamics) が実用化するに従って格子生成に手間や時間がかかり、複雑形状では計算時間よりも格子生成の時間の方が長くなってきている。このため、近年、直交格子による流体解析が再び話題となっている。直交格子による流体解析に関しては、[非特許文献1] ~ [非特許文献17] が知られている。

また、「強制振動円柱まわりの流れ」に関しては、[非特許文献18]に実験結果が開示され、「円柱の渦放出による自励振動」に関しては、[非特許文献19]にALE有限要素法による計算結果が開示されている。

【非特許文献1】

15 Saiki, E. M., Biringen, S., 1996, Numerical Simulation of a Cylinder in Uniform flow: Application of a Virtual Boundary Method, J. Comput. Phys. 123, 450-465.

20 【非特許文献2】

矢部孝・肖鋒, 1997, 固体・液体・気体の統一解法とCIP法(2), 数値流体力学, 7, 103-114.

【非特許文献3】

25 Ye, T., Mittal, R., Udaykumar, H. S., & Shyy, W., 1999, A Cartesian Grid Method for Viscous Incompressible Flows with Complex Immersed Boundaries, AIAA-99-3312, 545-557.

【非特許文献4】

中村明・下村信雄・里深信行, 1995, デカルト格子系による任意形状物体  
周りの圧縮性粘性流計算, 日本機械学会論文集, 61B-592, 4319-4  
326.

【非特許文献5】

- 5 市川治・藤井孝蔵, 2002, 直交格子を使用した三次元の任意形状物体まわ  
りの流体シミュレーション, 日本機械学会論文集, 68B-669, 1329-  
1336.

【非特許文献6】

- 10 朴炳湖・黒田成昭, 2000, 非圧縮性粘性流れの直交格子解法, ながれ, 1  
9, 37-46.

【非特許文献7】

- 15 Ono, K., Tomita, N., Fujitani, K., & Hime  
no, R., 1998, An Application of Voxel M  
odeling Approach to Prediction of En  
gine Cooling Flow, Society of Automot  
ive Engineers of Japan, Spring Conven  
tion, No. 984, 165-168.

【非特許文献8】

- 20 [http://kuwahara.isas.ac.jp/index.ht](http://kuwahara.isas.ac.jp/index.html)  
ml

【非特許文献9】

- 寺本進・藤井孝蔵, 1998, 直交格子法による三次元物体周りの流れ解析,  
第12回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 299-300.

【非特許文献10】

- 25 Quirk, J. J., 1994, An Alternative to U  
nstructured Grids for Computing Gas  
Dynamic Flows Around Arbitrarily Com  
plex Two-Dimensional Bodies, Compute  
rs Fluids, 23, 125-142.

## 【非特許文献11】

Karman, S. L. Jr., 1995, SPLITFLOW: A 3D Unstructured Cartesian/Prismatic Grid (12) dynamics of CFD Code for Complex  
5 Geometries, AIAA 95-0343.

## 【非特許文献12】

Hirt, C. W., & Nichols, B. D., 1981, Volume of Fluid (VOF) Method for the D Free Boundaries, J. Comput. Phys. 39, 201-2  
10 25.

## 【非特許文献13】

Hirt, C. W., & Cook, J. L., 1972, Calculating Three-dimensional Flows Around Structures and Over Rough Terrain, J.  
15 Comput. Phys. 10, 324-340.

## 【非特許文献14】

加瀬究・手嶋吉法, 2001, ボリュームCADの開発, 理研シンポジウム・ものづくり情報技術統合化研究, 第1回, 6-11.

## 【非特許文献15】

20 豊田郁夫・荒川忠一, 1999, 直交適合格子法による円柱周り流れの解析, 第13回数値流体力学シンポジウム, F03-1, CD-ROM.

## 【非特許文献16】

松宮輝・木枝香織・谷口伸行・小林敏雄, 1993, 三次精度風上差分法による二次元円柱周り流れの数値シミュレーション, 日本機械学会論文集, 59B-  
25 566, 2937-2943.

## 【非特許文献17】

Bouard, R., & Coutanceau, M., 1980, The early stage of development of the wake behind an impulsively started cylinder

nder for  $40 < Re < 10^4$ , J. Fluid Mech., 101-3, 583-607.

【非特許文献18】

Okamoto, S., Uematsu, R., and Tagawa, Y.,  
5 Fluid force acting on two-dimensional  
l circular cylinder in Lock-in phenom  
enon, JSME International Journal, B45,  
No. 4, (2002), 850-856.

【非特許文献19】

10 近藤典夫, 円柱の空力挙動に関する数値シミュレーション, 第15回数値流  
体力学シンポジウム, E09-2, (2001), CD-ROM.

流体解析では現在、複雑な三次元形状の流れ場も重合格子や非構格子技法を  
使って計算できるようになったが、メッシュ生成がシミュレーション全体の大き  
15 な部分を占めるようになった。このため、完全自動化できるメッシュ生成法とし  
て、直交格子を用いることが有望視されている。

直交格子系による任意形状の数値解析では、物体境界の取り扱いの難しさがよ  
く知られている。近年、流れ場の境界近くの離散化や境界条件の扱う方法によっ  
て、いくつかの直交格子法が提案されている。

20 例えば、仮想境界法【非特許文献1】(Virtual Boundary)、  
CIP【非特許文献2】(Cubic-Interpolated Propa  
gation) 密度関数法、Immersed Boundary metho  
d法【非特許文献3】、NPLC (Neighboring Point Lo  
cal Collocation) 法【非特許文献4】、格子点間に位置する境  
25 界までの距離を差分スキームに取り込む法【非特許文献5】、部分境界適合直交  
格子法【非特許文献6】などがある。

これらの方法は物体境界が厳密に扱われるが、その分計算処理が複雑であり、  
必ずしも任意形状の三次元問題に向いているとはいえない。

一方、実用化の観点から、直交格子法は基本的に直交格子だけで階段状の境界

を生成し、物体形状を近似する方法（例えば、小野〔非特許文献7〕・日産自動車、桑原〔非特許文献8〕・計算流体研）と、カットセルを導入して境界形状を取り扱う近似度を高める方法（例えば、藤井〔非特許文献9〕・宇宙研、Quirk〔非特許文献10〕・J. J., NASA）の二種類が有望である。

5      しかし、カットセルによる方法では、直交格子内を境界が任意の場所を通るため、境界上で隣り合ったセルの大きさに大きな差が生じることがあり、カットセル直交格子では粘性流れの解析が難しいという報告〔非特許文献11〕もあった。

10      上述したように、従来の重合格子や非構造格子を用いて、非圧縮粘性流体の流れ場の数値解析を行う場合には、格子生成を完全には自動化できず、そのため格子生成がシミュレーション時間全体に占める割合が高く、シミュレーション時間の短縮が困難な問題点があった。

15      一方、直交格子を用いた流れ場の数値解析は、格子生成を自動化できるものの、直交格子により物体境界を表現することが難しく、結果としてシミュレーション精度がわるい問題点があった。特に、移動境界に伴う流れの数値計算では、境界の移動距離が一定の大きさのメッシュの倍数に制約されるため、計算不安定に落ちる場合も多かった。

20      また特に、カットセルによる方法では、直交格子内を境界が任意の場所を通るため、境界上で隣り合ったセルの大きさに大きな差が生じることがあり、カットセル直交格子では粘性流れの解析が難しかった。

## 発明の要約

25      本発明は、かかる問題点を解決するために創案されたものである。すなわち、本発明の目的は、格子生成を完全に自動化することができ、物体境界の表現が容易であり、比較的簡単な計算処理により、計算不安定に落ちることなく、精度の高いシミュレーションを短時間で行うことができるV-CADデータを直接用いた非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法と装置を提供することにある。

本発明によれば、非圧縮性粘性流体と接する対象物の境界データからなる外部データ（12）を境界が直交する複数のセル（13）に分割する分割ステップ（A）



と、分割された各セルを対象物の内側に位置する内部セル（１３ａ）と境界データを含む境界セル（１３ｂ）とに区分するセル区分ステップ（Ｂ）と、前記境界データによる境界セル（１３ｂ）の稜線の切断点を求める切断点決定ステップ（Ｃ）と、求めた切断点を結ぶ多角形を境界面のセル内部データとする境界面決定ステップ（Ｄ）と、流れ場の境界に、VOF法を併用したカットセル有限体積法を適用して解析する解析ステップ（Ｅ）と、を備えたことを特徴とするV-CADデータを直接用いた非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法が提供される。

また、本発明によれば、非圧縮性粘性流体と接する対象物（１）の境界データからなる外部データ（１２）を入力する入力装置（２）と、形状と物理量を統合した実体データとその記憶演算プログラムを記憶する外部記憶装置（３）と、前記記憶プログラムを実行するための内部記憶装置（４）及び中央処理装置（５）と、実行結果を出力する出力装置（６）とを備え、

前記外部データを境界が直交する複数のセル（１３）に分割し、分割された各セルを対象物の内側に位置する内部セル（１３ａ）と境界データを含む境界セル（１３ｂ）とに区分し、前記境界データによる境界セル（１３ｂ）の稜線の切断点を求め、求めた切断点を結ぶ多角形を境界面のセル内部データとし、流れ場の境界に、VOF法を併用したカットセル有限体積法を適用して解析する、ことを特徴とするV-CADデータを直接用いた非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析装置が提供される。

さらに、本発明によれば、コンピュータに、非圧縮性粘性流体と接する対象物の境界データからなる外部データ（１２）を境界が直交する複数のセル（１３）に分割する分割ステップ（Ａ）と、分割された各セルを対象物の内側に位置する内部セル（１３ａ）と境界データを含む境界セル（１３ｂ）とに区分するセル区分ステップ（Ｂ）と、前記境界データによる境界セル（１３ｂ）の稜線の切断点を求める切断点決定ステップ（Ｃ）と、求めた切断点を結ぶ多角形を境界面のセル内部データとする境界面決定ステップ（Ｄ）と、流れ場の境界に、VOF法を併用したカットセル有限体積法を適用して解析する解析ステップ（Ｅ）と、を実行させるための非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析プログラムが提供される。

上記本発明の方法及び装置により、精度と安定性を有し、計算コストがあまり

かからず、かつ、格子生成を完全に自動化することができ、物体境界の表現が容易であり、比較的簡単な計算処理により、精度の高いシミュレーションを短時間で行うことができることが分かった。

5 本発明の好ましい実施形態によれば、前記解析ステップ（E）において、空間積分について、対流項に二次元のQ U I C K補間スキームを使用し、拡散項に二次精度の中心差分を用い、時間進行について、対流項と拡散項を合わせて二次精度のA d a m s - B a s h f o r t h法を適用し、圧力勾配項に一次精度のE u l e r陰解法を用いる。

10 この方法により、格子生成を完全に自動化することができ、かつ安定性と離散化精度を確保することができる。

二次元境界セルにおいて、有限体積法における支配方程式を式（7）であらわす。

$$\iint_{V_{i,j}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} dV = - \iint_{V_{i,j}} \text{div}(\bar{u} \otimes \bar{u}) dV - \iint_{V_{i,j}} \text{div}(p\bar{I}) dV + \frac{1}{\text{Re}} \iint_{V_{i,j}} \text{div}(\text{grad}(\bar{u})) dV \quad (7)$$

15 この式（7）は、非圧縮粘性流体の基礎支配方程式（1）をテンソル形の発散型に書き換えた式（6）を二次元境界セルの流体部分をコントロールボリューム（C V） $V_{i,j}$ として、空間積分したものであり、非圧縮粘性流体の基礎支配方程式（1）を満たすことができる。

20 有限体積法における支配方程式における対流項、圧力勾配項および拡散項を式（8）、（9）、（10）であらわす。

対流項：

$$\begin{aligned}
 \iint_{V_{i,j}} \text{div}(\bar{u} \otimes \bar{u}) dV &= \oiint_{S_{i-5}} (\bar{u} \otimes \bar{u}) \cdot \bar{n} dS = \sum_{m=1-5} (\bar{u} \otimes \bar{u})_m \cdot \bar{n} \delta S_m \\
 &= [\Delta y (B_{i,j} u_{i,j}^{(x)} - B_{i-1,j} u_{i-1,j}^{(x)}) \\
 &\quad + \Delta x (A_{i,j} u_{i,j+1/2}^{(y)} - A_{i,j-1} u_{i,j-1/2}^{(y)})] \bar{i} \\
 &\quad + [\Delta y (B_{i,j} v_{i,j+1/2}^{(x)} - B_{i-1,j} v_{i-1,j+1/2}^{(x)}) \\
 &\quad + \Delta x (A_{i,j} v_{i,j}^{(y)} - A_{i,j-1} v_{i,j-1}^{(y)})] \bar{j} \quad | \text{only no-slip on wall}
 \end{aligned} \tag{8}$$

圧力勾配項：

$$\begin{aligned}
 \iint_{V_{i,j}} \text{div}(p \bar{I}) dV &= \oiint_{S_{i-5}} (p \bar{I}) \cdot \bar{n} dS = \sum_{m=1-5} p_m \bar{I} \cdot \bar{n} \delta S_m \\
 &= \Delta y [B_{i,j} p_{i+1/2,j} - B_{i-1,j} p_{i-1/2,j} - p_p (B_{i,j} - B_{i-1,j})] \bar{i} \\
 &\quad + \Delta x [A_{i,j} p_{i,j+1/2} - A_{i,j-1} p_{i,j-1/2} - p_p (A_{i,j} - A_{i,j-1})] \bar{j}
 \end{aligned} \tag{9}$$

拡散項：

$$\begin{aligned}
 \iint_{V_{i,j}} \text{div}(\text{grad}(\bar{u})) dV &= \oiint_{S_{i-5}} \text{grad}(\bar{u}) \cdot \bar{n} dS = \sum_{m=1-5} \text{grad}(\bar{u})_m \cdot \bar{n} \delta S_m \\
 &= [\Delta y (B_{i,j} \text{grad}(u)_{i+1/2,j}^x - B_{i-1,j} \text{grad}(u)_{i-1/2,j}^x - (B_{i,j} - B_{i-1,j}) \text{grad}(u)_p^x) \\
 &\quad + \Delta x (A_{i,j} \text{grad}(u)_{i,j+1/2}^y - A_{i,j-1} \text{grad}(u)_{i,j-1/2}^y - (A_{i,j} - A_{i,j-1}) \text{grad}(u)_p^y)] \bar{i} \\
 &\quad + [\Delta y (B_{i,j} \text{grad}(v)_{i+1/2,j}^x - B_{i-1,j} \text{grad}(v)_{i-1/2,j}^x - (B_{i,j} - B_{i-1,j}) \text{grad}(v)_p^x) \\
 &\quad + \Delta x (A_{i,j} \text{grad}(v)_{i,j+1/2}^y - A_{i,j-1} \text{grad}(v)_{i,j-1/2}^y - (A_{i,j} - A_{i,j-1}) \text{grad}(v)_p^y)] \bar{j}
 \end{aligned} \tag{10}$$

式 (8) ~ (10) には、稜線の切断点を結ぶ対象物の境界データが含まれるため、境界における流れ場の非圧縮性粘性流体の数値解析ができる。

- 5 固体境界の積分において、固体境界でノースリップ境界条件の場合に、対流項は零とし、圧力勾配項と拡散項に対しては、切断線の間中点 P の値を平均値として用いて積分し、空間積分に対してはすべての項に開口率を適用する。

この方法により、直交格子の完全自動化が保たれ、かつ流体計算におけるコントロールボリュームで保存則を厳密に満たすことができる。

- 10 カットセルにおいて算出される物理変数の定義点を、VOF = 0.01 を閾値としてそれより小さい境界セルは完全な固体とみなし、それより大きい境界セル

において算出される変数をセルの中心に置く、また、稜線の変数定義点をセル稜線の中心に定義し、更に、線分4の中心点の変数値を線形補間により求める。

この方法によっても、直交格子の完全自動化が保たれ、かつ流体計算におけるコントロールボリュームで保存則を厳密に満たすことができる。

- 5 物体に働く抗力（流れ方向の力）と揚力（流れの垂直方向の力）を、式（12）（13）であらわす。

抗力：

$$\begin{aligned}
 F_x = F_D &= \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \right) dx dy \\
 &= \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \right) dx dy + \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \right) dy dx = \oint_S \sigma_{xx} ds + \oint_S \sigma_{xy} ds \\
 &= \int_{y_1}^{y_2} (\sigma_{xx}|_{f_1(y)} - \sigma_{xx}|_{f_2(y)}) dy + \int_{x_1}^{x_2} (\sigma_{xy}|_{g_1(x)} - \sigma_{xy}|_{g_2(x)}) dx \Big|_{\text{only Cartesian}}
 \end{aligned} \tag{12}$$

揚力：

$$\begin{aligned}
 F_y = F_L &= \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \right) dx dy \\
 &= \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} \right) dx dy + \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \right) dy dx = \oint_S \sigma_{yx} ds + \oint_S \sigma_{yy} ds \\
 &= \int_{y_1}^{y_2} (\sigma_{yx}|_{f_1(y)} - \sigma_{yx}|_{f_2(y)}) dy + \int_{x_1}^{x_2} (\sigma_{yy}|_{g_1(x)} - \sigma_{yy}|_{g_2(x)}) dx \Big|_{\text{only Cartesian}}
 \end{aligned} \tag{13}$$

- 10 この式により、直交格子において、抗力と揚力を容易かつ精度よく求めることができる。

移動境界を伴う流体構造連成解析において、所定の時間刻み毎に、流体系と構造系を別々に解析し、それぞれの境界条件を陽的に受け渡す、ことが好ましい。

- 15 この解析方法により、流体系と構造系を連立して統一的に扱う強連成に比較して計算処理を簡略化でき、計算時間を短縮化できる。また境界の移動距離が一定の大きさのメッシュの倍数に制約されないので、計算不安定に落ちいることがほとんどない。

円柱の強制振動の流体構造連成解析において、円柱が弾性支持された剛体構造

物として、流れ方向に対して直角方向に振動する 1 質点 1 自由度系モデルと仮定し、円柱中心の Y 方向の変位を式 (17) で与え、円柱表面の Y 方向の速度境界条件を、式 (18) で与える。

$$y = A \sin(2\pi f_c t) \quad (17)$$

$$v_y = A 2\pi f_c \cos(2\pi f_c t) \quad (18)$$

5

また、式 (18) から求められた振動する円柱の運動速度を、流れ場の速度境界条件として計算時間ステップごとに変化して与える。

この解析方法により、(1) 振動する円柱に作用する抗力および揚力が静止円柱のものより大きい、(2) Strouhal 数 0.2 付近の  $0.15 < f_c < 0.25$  において、強制振動による渦放出周波数のロックイン現象がよく再現される、(3) ロックイン領域での抗力や揚力が増大する、等、実験データと整合性の高い解析結果が確認された。

また円柱の渦放出による自励振動の流体構造連成解析において、有次元の振動方程式を 1 質点 1 自由度のダンパ・ばねモデルとて、式 (19) 又は式 (20) であらわす。

$$m \frac{d^2 \bar{y}}{dt^2} + c \frac{d\bar{y}}{dt} + k\bar{y} = \frac{1}{2} \rho U_o^2 D C_L \quad (19)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + (4\pi h f_o) \frac{dy}{dt} + (2\pi f_o)^2 y = \frac{8h}{Sc} C_L \quad (20)$$

さらに式 (20) から求められた振動する円柱の運動速度を、流れ場の速度境界条件として計算時間ステップごとに変化して与える。

また円柱の初期変位と初期速度を 0 とし、かつ式 (20) の揚力は現在の値を用いて陽的に与え、式 (20) の振動方程式をニューマークの  $\beta$  法により積分し、円柱の振動変位と振動速度を求める。

この解析方法により、(1) 無次元流速  $V_r = 4$  (円柱の固有振動数  $f_o = 1/4 = 0.25$ ) の場合に円柱の振幅がもっとも大きくなる、(2) 最大変位  $y$  が、 $V_r = 2, 3, 4$  では  $y$  の最大変位は次第に大きくなり、 $V_r = 4$  で最大

20

になる、(3)その後、 $V_r$ が大きくなるにつれて、 $y$ の最大変位は波状に小さくなっていく、等、ALE有限要素法による計算結果と定性的に一致していることが確認された。

5 本発明のその他の目的及び有利な特徴は、添付図面を参照した以下の説明から明らかになる。

#### 図面の簡単な説明

- 10 図1は、先行出願の実体データの記憶方法のフロー図である。  
図2は、本発明の数値解析方法を実行するための数値解析装置の構成図である。  
図3は、本発明の数値解析方法とそのプログラムのフロー図である。  
図4Aと図4Bは、二次元における開口率の定義を示す図である。  
図5は、境界セルにおける有限体積法による空間離散化の説明図である。  
15 図6A、B、Cは、解析した3ケースのVOF分布を示す画像である。  
図7A、B、Cは、解析した3ケースの流れ方向速度の分布と理論解析解との比較図である。  
図8は、解析格子とVOF分布を示す画像である。  
図9は、速度ベクトルを示す画像である。  
20 図10は、圧力等値線を示す画像である。  
図11は、本発明による平均抗力係数を示す図である。  
図12は、本発明による平均Strouhal数を示す図である。  
図13Aは、直交適合格子法による静止円柱の抗力係数を示す図であり、図13Bは、その平均Strouhal数を示す図である。  
25 図14Aは、一般座標系境界適合格子による静止円柱の抗力係数を示す図であり、図14Bはその平均Strouhal数を示す図である。  
図15Aは、 $Re = 300$ 、 $T = 2.5$ の場合の実験による流脈線を示す画像であり、図15Bはその流線を示す画像である。  
図16Aは、 $Re = 550$ 、 $T = 2.5$ の場合の実験による流脈線を示す画像

であり、図 16 B は、その流線を示す画像である。

図 17 A は、抗力と揚力の履歴変化を示す本発明の結果であり、図 17 B は、その部分境界適合直交格子法の結果である。

図 18 A ~ F は、実用問題に向けての応用例を示す画像である。

5 図 19 A ~ I は、静止円柱と各振動数での円柱に作用する流体力の抗力係数  $C_D$  および揚力係数  $C_L$  の時間履歴の変動波形を示す図である。

図 20 は、流れの渦放出状態を表す  $Strouhal$  数  $St$  と強制振動周波数  $f_c$  の関係図である。

10 図 21 A ~ C は、無次元流速  $V_r$  が 2, 3, 4 における変位  $y$  (左図) と抗力係数  $C_D$  及び揚力係数  $C_L$  (右図) の時間履歴を示す図である。

図 22 D ~ G は、無次元流速  $V_r$  が 5, 6, 7, 8 における変位  $y$  (左図) と抗力係数  $C_D$  及び揚力係数  $C_L$  (右図) の時間履歴を示す図である。

図 23 は、各々の無次元流速  $V_r$  に対する  $y$  の最大変位を示す図である。

15

### 好ましい実施例の説明

以下、本発明の好ましい実施形態を図面を参照して説明する。

20 図 2 は、本発明の数値解析方法を実行するための数値解析装置の構成図である。この図に示すように、本発明の数値解析装置 10 は、入力装置 2、外部記憶装置 3、内部記憶装置 4、中央処理装置 5 および出力装置 6 を備える。

25 入力装置 2 は、例えばキーボードであり、対象物 1 の形状データからなる外部データ 12 を入力する。外部記憶装置 3 は、ハードディスク、フロッピーディスク、磁気テープ、コンパクトディスク等であり、形状と物理量を統合した実体データとその記憶演算プログラムを記憶する。内部記憶装置 4 は、例えば RAM, ROM 等であり、演算情報を保管する。中央処理装置 5 (CPU) は、演算や入出力等を集中的に処理し、内部記憶装置 4 と共に、記憶プログラムを実行する。出力装置 6 は、例えば表示装置とプリンタであり、記憶した実体データと記憶プログラムの実行結果を出力するようになっている。

本発明の記憶演算装置 10 は、上述した外部記憶装置 3、内部記憶装置 4、及び中央処理装置 5 により、外部データを境界が直交する複数のセル 13 に分割し、分割された各セルを対象物の内側に位置する内部セル 13 a と境界データを含む境界セル 13 b とに区分し、境界データによる境界セル 13 b の稜線の切断点を求め、求めた切断点を結ぶ多角形を境界面のセル内部データとし、流れ場の境界に、VOF法を併用したカットセル有限体積法を適用して解析する。

図 3 は、本発明の数値解析方法とそのプログラムのフロー図である。この図に示すように、本発明の方法及び変換プログラムは、分割ステップ (A)、セル区分ステップ (B)、切断点決定ステップ (C)、境界面決定ステップ (D)、及び解析ステップ (E) からなる。

外部から入力する外部データ 12 は、多面体を表すポリゴンデータ、有限要素法に用いる四面体又は六面体要素、3次元CAD又はCGツールに用いる曲面データ、或いはその他の立体の表面を部分的な平面や曲面で構成された情報で表現するデータである。

外部データ 12 は、このようなデータ (S-CADデータと呼ぶ) のほかに、(1) V-CAD独自のインターフェース (V-interface) により人間の入力により直接作成されたデータと、(2) 測定機やセンサ、デジタルなどの表面のデジタルデータや、(3) CTスキャンやMRI、および一般的にVolumeレンダリングに用いられているボクセルデータなどの内部情報もつVolumeデータであってもよい。

分割ステップ (A) では、外部データ取得ステップ (図示せず) で取得した非圧縮性粘性流体と接する対象物の境界データからなる外部データ 12 を境界平面が直交する複数のセル 13 に分割する。この分割は、3次元の場合は、八分木分割であり、2次元の場合には4分割である。

すなわちこの分割ステップ (A) における分割とは、目的とする非圧縮性粘性流体と接する対象物を含む、基準となる直方体 (または矩形) を分割 (8分割又は4分割) し、それぞれの領域の中に立体が完全に含まれるか、含まれなくなるまで再帰的に分割処理を繰り返す。この分割によりボクセル表現よりも大幅にデータ量を減らすことができる。



空間分割により分割された一つの空間領域をセル 1 3 とよぶ。セルは境界が直交する直方体または矩形である。セルによる階層構造、分割数もしくは分解能によって空間中に占める領域を表現する。これにより空間全体の中で対象は大きさの異なるセルを積み重ねたものとして表現される。

- 5 セル区分ステップ (B) では、分割された各セルを対象物の内側に位置する内部セル 1 3 a と境界データを含む境界セル 1 3 b とに区分する。

すなわち本発明では非圧縮性粘性流体と接する対象物の内側または外側に完全に内部に含まれるものはその最大の大きさをもつ内部セル 1 3 a (立方体) とし、外部データ 1 2 からの境界情報を含むセルは境界セル 1 3 b とする。

- 10 切断点決定ステップ (C) では、境界データによる境界セル 1 3 b の稜線の切断点を求める。

境界面決定ステップ (D) では、求めた切断点を結ぶ多角形を境界面のセル内部データとする。以下、かかる切断点を結ぶ多角形を含むセルを「カットセル」と呼ぶ。

- 15 解析ステップ (E) では、上述した内部セル 1 3 a と境界セル 1 3 b に対して、流れ場の境界に、VOF 法を併用したカットセル有限体積法を適用して非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析を行う。

以下、本発明を更に詳細に説明する。

- 20 1. 本発明では V-CAD プログラムにおける実用性のある流体解析技術を目指し、カットセル (KTC) 直交格子による任意形状の非圧縮粘性流れの解析方法を開発した。本発明において、流れ場の境界での扱いについては、Hirt らが提案している VOF (Volume Of Fluid) 法 [非特許文献 1 2] を併用したカットセル有限体積法を用いた。また本発明の方法による内部流であるチャンネル内流れと、外部流の円柱まわり流れを解析し、実験データ、理論解、及び既存の方法による解析結果との比較を行った。更に、本解析法の応用例として、いくつかの計算結果を合わせて示した。

## 2. 基礎方程式と計算方法

## 2. 1 基礎方程式

本発明で用いる基礎支配方程式は〔数4〕の式(1)(2)に示す非圧縮粘性流体のNavier・Stokes方程式と連続の式である。

【数4】

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

5

ここでReは流れ場の代表長さと代表速度で定義されるレイノルズ数と呼ばれる無次元数であり、物理的には流れ場における慣性力と粘性力の比を表している。uは速度、pは圧力である。また、 $i = 1, 2, 3$ 、 $j = 1, 2, 3$ は直交座標系での各方向を表している。なお、 $i, j$ に関しては縮約を取ることとして、これ以降もそのように表すものとする。式(1)より流れ場における外力 $f_i$ を考慮しない場合に非圧縮粘性流体の運動はただ一つのパラメータReで支配されていることが分かる。

## 2. 2 計算精度・計算コスト及び計算方法

15 流体のシミュレーションは一種の数値実験であり、つねに一定の誤差を伴う。流体解析を精度よく行うには、以下の四つの条件が必要となる。

① 流れの最小長さスケール(境界層・渦・衝撃波・火炎面など)を捕られるほど細かい空間解像度。

② 流れの最大長さスケールを十分に捕獲するほど大きい計算領域と、人為的な流入・流境界条件・壁によるブロッキングなど影響を無視できるほどの計算領域。

③ 打ち切り誤差や数値拡散などを無視できるほど十分な空間的・時間的な離散化精度。

④ 特定問題に即したモデル(壁面モデル・乱流SGSモデル・燃焼モデルなど)やスキーム(K-K・QUICK・MUSCL・TVD・ENOなど)、差分法

25

を援用すれば、できるだけ直交等方性のある格子。

流体解析の計算コスト（計算時間・必要なメモリ）は、その計算方法に求められる解析精度によって決められるといえる。実用的な流体解析では、ある程度の精度（例えば、普通の物理実験の精度範囲や、ユーザーに求められる精度）があれば、十分と考えられる。

一方、流れ場は内部流、外部流及びそのほか（例えば噴流）に分類される。一般に外部流の解析領域は内部流のものより大きくとるのが普通である。本発明では実用性の観点から、外部流の場合には、流れ場の代表長さスケール $D$ （ $=1$ ）として、解析領域の大きさはすべて $10D \times 10D$ とした。

本発明では、差分法を併用した有限体積法を用いる。ある程度の安定性や離散化精度を確保するため、空間積分について、対流項に二次元のQUICK補間スキームを使用し、拡散項に二次精度の中心差分を用いる。時間進行について、対流項と拡散項を合わせて二次精度のAdams-Bashforth法を適用し、圧力勾配項に一次精度のEuler陰解法を用いる。解析アルゴリズムとしての圧力と速度のカップリングには、Hirtらにより提案された圧力と速度を同時緩和するSOLA-HSMAC法〔非特許文献13〕を使用し、緩和係数1.65でSOR法を用いて反復計算を行う。収束判定は連続方程式（2）の残差が0.0002とする。また圧力振動を防ぐために三方向の速度 $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、及び圧力 $p$ の格子上の定義点を、半メッシュをずれるスタガード格子を配置する。

## 2. 3 V-CADデータによる固体・流体境界の取扱い

Volume-CADシステムの中でもっとも重要なアルゴリズムは加瀬・手嶋〔非特許文献14〕により提案されるセルの切断点からモノの表面形状を復元するKTCアルゴリズムである。このKTCアルゴリズムは流体解析分野における直交格子カットセル（Cut Cell）法と同じ概念であることを注意されたい。また、KTCは二次元においても一個のセルの四つの稜線上に2個以上の交点（切断点）があり得るが、本発明では簡単のために二次元で一個のセルの稜線上に2個だけの切断点に限るとする。この場合のKTCは図4Aと図4Bに示すように二種類しかないとわかる。

カットセル法における開口率は、セルの稜線に流体部分が占める比率として図

4 Aと図4Bに示すように流体・固体境界とセル稜線との交点情報から【数5】  
の式(3)で定義される。

ここで、 $\Delta x_{i,j}$ 、 $\Delta y_{i,j}$ はそれぞれX方向とY方向の格子幅であり、 $A_{i,j}$ 、 $B_{i,j}$ はX方向とY方向の開口率である。また、 $Vx_{i,j}$ 、 $Vy_{i,j}$ はその  
5 セル稜線上に固体が占める線分を表す。

各方向の開口率が分かれば、VOF法における流体の体積占有率は【数5】の  
式(4)と式(5)により求められる。

【数5】

$$A_{i,j} = \frac{\Delta x_{i,j} - Vx_{i,j}}{\Delta x_{i,j}} \quad B_{i,j} = \frac{\Delta y_{i,j} - Vy_{i,j}}{\Delta y_{i,j}} \quad 0 \leq A_{i,j}, B_{i,j} \leq 1 \quad (3)$$

$$VF_{i,j} = 1 - 0.5(2 - A_{i,j} - A_{i,j-1})(2 - B_{i,j} - B_{i-1,j}) \quad (4)$$

$$\text{when}(A_{i,j} + A_{i,j-1} > 1) \text{ and } (B_{i,j} + B_{i-1,j} > 1)$$

$$VF_{i,j} = 0.5(A_{i,j} + A_{i,j-1})(B_{i,j} + B_{i-1,j}) \quad (5)$$

$$\text{when}(A_{i,j} + A_{i,j-1} \leq 1) \text{ or } (B_{i,j} + B_{i-1,j} \leq 1)$$

10

## 2. 4 VOF有限体積法による離散化

有限体積法で保存型の支配方程式を離散化する場合、方程式(1)の積分形を  
グリーン定理(発散定理)に適用するため、微分型の方程式(1)をテンソル形  
の発散型に書き換えると【数6】の式(6)のようになる。

15 ここで、 $\odot$ に $\times$ はテンソル積であり、ベクトルIはKronecker  $\delta_{ij}$   
に対応する単位テンソルである。

流体固体境界での離散化は、本発明の肝心なところになる。境界セル以外の格  
子における有限体積法による直交格子での離散化は従来の方法でもあまり問題が  
生じないのでここでは省略する。流体固体境界では図4のようなKTCセルを想  
20 定して式(6)の空間離散化を行う。また式(6)の時間離散化について、流体  
占有率VOFを用いてコントロールボリューム(CV)内における速度の時間勾  
配を平均値とみなして、従来の方法通りで行えるため、境界セルでの時間離散化  
の説明も省く。

さて、図5の二次元境界セルの流体部分をコントロールボリューム(CV)  $V_{i,j}$  として、式(6)を空間積分する(ここで簡単のため外力項ベクトル  $\vec{f} = 0$  とした)と、有限体積法における支配方程式は[数6]の式(7)になる。

【数6】

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\text{div}(\vec{u} \otimes \vec{u}) - \text{div}(p\vec{I}) + \frac{1}{\text{Re}} \text{div}(\text{grad}(\vec{u})) + \vec{f} \quad (6)$$

$$\iint_{V_{i,j}} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} dV = - \iint_{V_{i,j}} \text{div}(\vec{u} \otimes \vec{u}) dV - \iint_{V_{i,j}} \text{div}(p\vec{I}) dV + \frac{1}{\text{Re}} \iint_{V_{i,j}} \text{div}(\text{grad}(\vec{u})) dV \quad (7)$$

5

式(7)における対流項、圧力勾配項および拡散項をそれぞれグリーン定理(発散定理)に適用すると、コントロールボリュームにおける面積分(三次元の場合に体積積分)は、閉直線の線積分(三次元の場合に閉平面の面積分)に転換され、  
 10 図5のコントロールボリュームの五つの稜線(1→2→3→4→5→1)に(反時計まわり方向をとる)沿って線積分することになる。本発明のデカルト座標では、上記の対流項、圧力勾配項および拡散項はそれぞれ[数7]のように離散化される。

## 【数 7】

対流項：

$$\begin{aligned}
\iint_{V_{i,j}} \text{div}(\bar{u} \otimes \bar{u}) dV &= \oiint_{S_{i-5}} (\bar{u} \otimes \bar{u}) \cdot \bar{n} dS = \sum_{m=1-5} (\bar{u} \otimes \bar{u})_m \cdot \bar{n} \delta S_m \\
&= [\Delta y (B_{i,j} u_{i,j}^{(x)} - B_{i-1,j} u_{i-1,j}^{(x)}) \\
&\quad + \Delta x (A_{i,j} u_{i,j+1/2}^{(y)} - A_{i,j-1} u_{i,j-1/2}^{(y)})] \bar{i} \\
&\quad + [\Delta y (B_{i,j} v_{i,j+1/2}^{(x)} - B_{i-1,j} v_{i-1,j+1/2}^{(x)}) \\
&\quad + \Delta x (A_{i,j} v_{i,j}^{(y)} - A_{i,j-1} v_{i,j-1}^{(y)})] \bar{j} \quad \text{only no-slip on wall}
\end{aligned} \tag{8}$$

圧力勾配項：

$$\begin{aligned}
\iint_{V_{i,j}} \text{div}(p \bar{I}) dV &= \oiint_{S_{i-5}} (p \bar{I}) \cdot \bar{n} dS = \sum_{m=1-5} p_m \bar{I} \cdot \bar{n} \delta S_m \\
&= \Delta y [B_{i,j} p_{i+1/2,j} - B_{i-1,j} p_{i-1/2,j} - p_p (B_{i,j} - B_{i-1,j})] \bar{i} \\
&\quad + \Delta x [A_{i,j} p_{i,j+1/2} - A_{i,j-1} p_{i,j-1/2} - p_p (A_{i,j} - A_{i,j-1})] \bar{j}
\end{aligned} \tag{9}$$

拡散項：

$$\begin{aligned}
\iint_{V_{i,j}} \text{div}(\text{grad}(\bar{u})) dV &= \oiint_{S_{i-5}} \text{grad}(\bar{u}) \cdot \bar{n} dS = \sum_{m=1-5} \text{grad}(\bar{u})_m \cdot \bar{n} \delta S_m \\
&= [\Delta y (B_{i,j} \text{grad}(u)_{i+1/2,j}^x - B_{i-1,j} \text{grad}(u)_{i-1/2,j}^x - (B_{i,j} - B_{i-1,j}) \text{grad}(u)_p^x) \\
&\quad + \Delta x (A_{i,j} \text{grad}(u)_{i,j+1/2}^y - A_{i,j-1} \text{grad}(u)_{i,j-1/2}^y - (A_{i,j} - A_{i,j-1}) \text{grad}(u)_p^y)] \bar{i} \\
&\quad + [\Delta y (B_{i,j} \text{grad}(v)_{i+1/2,j}^x - B_{i-1,j} \text{grad}(v)_{i-1/2,j}^x - (B_{i,j} - B_{i-1,j}) \text{grad}(v)_p^x) \\
&\quad + \Delta x (A_{i,j} \text{grad}(v)_{i,j+1/2}^y - A_{i,j-1} \text{grad}(v)_{i,j-1/2}^y - (A_{i,j} - A_{i,j-1}) \text{grad}(v)_p^y)] \bar{j}
\end{aligned} \tag{10}$$

ここで、速度変数の下添え字はスタガード格子ステンシルにより変化することを注意されたい。またはベクトル  $i, j$  はそれぞれ X 方向と Y 方向の方程式を表す。対流項の離散式 (8) の中に上添え字 (x) (y) が付いた速度は、それぞれ X 方向と Y 方向に二次元 QUICK 補間を適用する。拡散項の離散式 (10) の中に上添え字 x、y が付いた速度勾配は、それぞれ X 方向と Y 方向の速度勾配を表し、そこで各々二次中心差分を適用する。

カットセルによる離散化には、二つのキーポイントがあることを注意されたい。

- 10 キーポイントの一つは固体境界 (図 5 の切断線 4) の積分の取り扱いである。有限体積法では、一階偏微分の対流項と圧力勾配項の境界条件はディリクレ条件

であり、二階偏微分の拡散項の境界条件はノイマン問題となる。固体境界でノースリップ境界条件の場合に、図5の切断線4のところに対流項が零となるから対流項を積分しなくてもいいが、圧力勾配項と拡散項に対して切断線4のところに積分しなければいけない。これは式(9)と式(10)の各々最後の項に切断線4の中間点Pの値を(平均値として)用いて積分するわけである。また空間積分に対してすべての項に開口率を適用する必要もあることを注意されたい。

もう一つのキーポイントは、カットセルにおいて算出される物理変数の定義点である。有限体積法では流体占有率VOFで体積平均を行うため、物理変数の定義点は流体のコントロールボリュームの中心(例えば図5の○に・点で示すC点)に置くのが自然だが、そうすると直交等間隔格子の完全自動化メリットがなくなる。その故、本発明ではVOF=0.01を閾値としてそれより小さい境界セルは完全の固体とみなし、それより大きい境界セルにおいて算出される変数はコントロールボリュームの中心ではなく、セルの中心(例えば図5の○に+印で示すD点)に置くこととする。同じく図5の稜線3と稜線5の変数定義点も線分の中心○ではなく、セル稜線の中心◎に定義される。また線分4の中心点Pに変数が定義されていないため、本発明でその点の変数値を線形補間により求める。こう処理すると、固体境界の再現性を損するものの、直交格子の完全自動化が保たれ、実用化に向ける。また流体の計算はコントロールボリュームで保存則が厳密に満たされ、上記の処理は流れ場の計算精度に及ぼす影響がそれほど大きくないと考えられる。

## 2.5 物体に働く抗力と揚力について

物体まわりの流れを解析するとき、その物体に働く抗力と揚力の計算について、一般座標系の境界適合格子の場合に物体の第1格子点に沿って積分すれば簡単だが、直交格子で取り扱う場合にはやや煩雑となる。そこで本発明では、以下の方法で抗力と揚力を求める。

物体に働く力は、その物体表面に作用する流体応力テンソルを閉積分して、グリーン定理を適用すれば、二次元の場合に[数8]の式(11)ように得られる。

ここで $\sigma_n$ は法線方向の平面に働く応力テンソル、 $\sigma$ は物体表面の点での応力テンソルである。また二次元の二階応力テンソルの発散はそのテンソルの四つの

方向からなることを注意されたい。それでX方向を流れ方向、Y方向を流れの垂直方向とすると、物体に働く抗力（流れ方向の力）と揚力（流れの垂直方向の力）は、グリーン定理を再び適用すると〔数8〕の式（12）（13）のようになる。

5 抗力と揚力が分かれば、無次元量としての抗力係数 $C_D$ と揚力係数 $C_L$ を、主流速度 $U$ 、流体密度 $\rho$ 及び物体の基準面積 $A$ （二次元の場合は基準長さ）を用いて〔数5〕の式（14）のように無次元化される。

また非定常現象を表わす無次元量のストローハル数 $S_t$ は、 $C_L$ の周波数 $f_L$ から〔数8〕の式（15）で求める。



【数 8】

$$\begin{aligned}
 F &= \oint_S \sigma_n ds = \iint_V \text{div} \sigma dV = \iint_V \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} dV = \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{xj}}{\partial x_j} + \frac{\partial \sigma_{yj}}{\partial y_j} \right) dV \\
 &= \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \right) dx dy + \left( \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \right) dx dy = F_x \vec{i} + F_y \vec{j}
 \end{aligned} \quad (11)$$

抗力：

$$\begin{aligned}
 F_x &= F_D = \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \right) dx dy \\
 &= \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \right) dx dy + \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \right) dy dx = \oint_S \sigma_{xx} ds + \oint_S \sigma_{xy} ds \\
 &= \int_{y_1}^{y_2} (\sigma_{xx}|_{f_1(y)} - \sigma_{xx}|_{f_2(y)}) dy + \int_{x_1}^{x_2} (\sigma_{xy}|_{g_1(x)} - \sigma_{xy}|_{g_2(x)}) dx \Big|_{\text{only Cartesian}}
 \end{aligned} \quad (12)$$

揚力：

$$\begin{aligned}
 F_y &= F_L = \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \right) dx dy \\
 &= \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} \right) dx dy + \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \right) dy dx = \oint_S \sigma_{yx} ds + \oint_S \sigma_{yy} ds \\
 &= \int_{y_1}^{y_2} (\sigma_{yx}|_{f_1(y)} - \sigma_{yx}|_{f_2(y)}) dy + \int_{x_1}^{x_2} (\sigma_{yy}|_{g_1(x)} - \sigma_{yy}|_{g_2(x)}) dx \Big|_{\text{only Cartesian}}
 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\sigma_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad \sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \sigma_{yy} = -p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (14)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\rho U^2 D/2} \quad C_L = \frac{F_L}{\rho U^2 D/2} \quad (15)$$

$$St = f_L D / U \quad (16)$$

### 3. 計算結果および考察

- 5 流体の数値解析において解析スキームや数値モデルなどを検証することにあたって、内部流のベンチマークテストとしてチャンネル流れと、外部流のベンチマー

クテストとしての円柱まわりの流れはしばしば検証の対象となる。本発明でも、上記のVOF法を併用したカットセル有限体積法を検証するために、解析理論解のある二次元Poiseuille流と、多くの実験や計算データのある静止円柱まわりの流れについて数値解析を行い、他の研究者のデータとの比較を行った。

- 5    5    なお、実用問題に向けての応用例として、バックステップを過ぎる流れ、狭窄管内の流れ、チャンネル内障害物周りの流れ、分岐管内の流れ、複数Bluff Bodyまわりの流れや予混合燃焼器内の流れなどについて解析を行い、その計算結果の可視化例を示す。

### 3. 1    チャンネルPoiseuille流による検証

- 10    10    セルのカットされたVOFの効果を検証するため、 $10D \times 10D$ 正方形の解析領域におけるダクトを、0度、10度及び45度を斜めにして解析を行った。全体の格子数は $64 \times 64$ 、ダクトの半幅は $2.5D$ 、この半幅で定義されるレイノルズ数 $Re = 1$ 、時間刻み $\Delta t = 0.0001$ 、解析時間 $steps = 10000$ とする。ダクトの流入条件と流出条件はともに放物型の分布を仮定した。
- 15    15    流れ方向の圧力勾配は $1.0$ とした。またHSMAC法を用い、入口・出口および壁での圧力境界条件は直接与えていない。三ケースのVOF分布を図6A, B, Cに示す。図6A, B, Cにおける破線は、境界を示している。その三ケースに対応する流れ方向速度分布を理論解析解と比較して図7A, B, Cに示す。

- 20    20    図7A, B, Cの中に線Aのanalysisは理論解析解であり、線Bの $i = 32$ は第32格子点断面にある流れ軸中心での流れ垂直断面の速度分布である。ダクトを傾けない（角度0）計算結果の速度分布は解析解とよく一致し、傾斜角度を10度、45度にすると、軸中心の最大速度がわずかに過小評価されるものの、全体として解析結果は理論解と一致していると言える。

### 3. 2    静止円柱まわり流れによる検証

- 25    25    解析スキームやモデルなどの検証対象となる円柱まわり流れの解析は、直交格子にとって最も困難な例題であろう。本発明では、3. 1の解析領域（ $10D \times 10D$ ）と格子数（ $64 \times 64$ ）のままで、円柱直径 $D$ で定義されるレイノルズ数の $Re = 1$ から $Re = 20000$ までの24ケースについて、一様流中に置かれている静止円柱まわり流れの解析を行った。計算の無次元時間は $100$ とし、

円柱の円心座標の図6のように $X = 2.5D$ ,  $Y = 5.0D$ とした。速度の境界条件として、円柱表面で滑り無し条件、流入側の流入条件は一様流（流れ方向速度 $= 1.0$ ）条件、流出側の流出条件は $X$ 方向に自由流出（速度勾配0）、 $Y$ 方向にフリースリップ条件とした。また、HSMAC法を用いて速度・圧力を同時に緩和するため、流入・流出および壁での圧力境界条件を直接与える必要がない。

図8は解析格子と解析全領域のVOF分布を示す。図9、図10はレイノルズ数 $Re = 300$ の場合の、速度ベクトルと圧力等値線であり、円柱後方に周期的なカルマン渦列の形成が観察されており、非定常流の流れパターンの特徴を捉えている。これはレイノルズ数 $Re > 80$ の場合に共通なので、他のレイノルズ数における計算結果は省略した。

図11、図12にそれぞれ実験データなどと比較した無次元時間50～100にわたる抗力係数の平均値と、平均Strouhal数を示す。抗力係数について、低レイノルズ数（ $Re < 60$ ）の本発明による計算結果は今井の式による結果（B）とよく一致している。レイノルズ数 $Re = 100$ 付近あたりにおいて、本発明による計算結果は実験データ（C）と比較してわずかに小さくなっている。レイノルズ数 $Re > 400$ では、本発明による計算結果は実験データ（C）とほとんど相違がない結果となっている。

これは主に本発明で用いる空間解像度（ $10/64 = 0.15$ ）が低いので、 $Re = 100$ （O）オーダー以上になると、円柱壁における境界層は十分に解像されていないと考えられる。図11から分かるようにレイノルズ数 $Re > 50$ では、カットセル無しの階段近似による計算結果（D）は実験より明らかに過大評価される。これに対して、本発明で提案したカットセルVOF法による計算は、計算結果（D）に比べて大幅に改善されていることが分かる。

図12の平均Strouhal数について、本発明での計算結果は、実験データより大きめであるが、レイノルズ数 $Re > 200$ の適正值とされる0.2～0.25の範囲に収まっていることがわかる。

図13A, Bに他の研究者による直交適合格子法〔非特許文献15〕を使用した円柱の抗力係数とStrouhal数の解析結果を示す。また図14A, Bに一般座標系適合格子法〔非特許文献16〕による抗力係数とStrouhal数

の解析結果を示す。これら従来の方法による結果では、レイノルズ数  $Re > 200$  の適正值とされる  $0.2 \sim 0.25$  の範囲から部分的に外れていることがわかる。従って本発明による平均 *Strouhal* 数の計算結果（図11、図12）は、これら従来境界適合格子による計算結果と比べて計算精度が優れていることが分かる。

レイノルズ数  $Re = 300$  の場合に無次元時間  $T = 2.5$  の時の可視化実験〔非特許文献17〕の結果と、本発明での同じ条件による計算結果の円柱近傍拡大図を図15A、Bに示す。またレイノルズ数  $Re = 550$  の場合（無次元時間  $T = 2.5$ ）に実験〔非特許文献17〕と対照する円柱付近の計算結果を図16A、Bに示す。

上記の図から分かるようにいずれのケースで円柱付近の双子渦の形状や大きさ、円柱直後から渦の循環再合流までの距離など、本発明での計算結果は可視化実験とよく一致している。

図17A、Bにレイノルズ数  $Re = 200$  場合の、本発明の方法による円柱抗力と揚力の時間履歴変化を、朴ら〔非特許文献6〕により提案された部分境界適合直交格子法による計算結果と比較して示す。この図から、本発明の等間隔直交格子による抗力および *Strouhal* 数は、部分境界適合直交格子法による結果とよく一致していることが確認された。なお、本発明の揚力の変動幅は部分境界適合直交格子法による結果より小さく評価されているが、これは主に〔非特許文献6〕の計算領域は  $30D \times 15D$  であり、流出境界として放射条件を使用しているためと考えられる。

ここで図に示されていないが、本発明でレイノルズ数  $Re = 1$  から  $Re = 20000$  までの24ケース計算を行ったが、レイノルズ数80以上でカルマン渦が出るようになった。実験や理論の臨界レイノルズ数  $Re = 50$  位に比べてやや大きめであるが、実用上十分であると思われる。

### 3. 3 実用問題に向けての応用例

今回開発した解析方法をいくつかの例に応用してみた。それらは図18A～Fのようにバックステップを過ぎる流れ（A）、狭窄管内の流れ（B）、チャンネル内障害物周りの流れ（C）、分岐管内の流れ（D）、複數 *Bluff Body*

まわりの流れ（E）や予混合燃焼器内の流れ（F）などである。

ここに示しているのはX方向速度u分布のみであり、これらの応用例の計算は3. 1のダクト計算や3. 2の円柱まわりの計算と同じように計算領域は $10D \times 10D$ で、格子数は $64 \times 64$ とした。またレイノルズ数は $Re = 100$ 、流入条件や流出条件等は3. 2の計算と同じにした。つまり、開発した計算プログラムを変更することなく、V-CADデータを直接に入力するだけで、任意形状の流れ場を計算できるようになった。

4. 次に本発明の解析方法を移動境界に伴う流れの数値計算（流体構造連成解析）に適用する。流体構造連成解析は、風工学や熱交換器など工学的見地において特に重要である。

流体構造連成解析の具体例として、（1）一様流の中に置かれた二次元円柱の強制振動と、（2）円柱の渦自励振動（渦励振）の数値計算を行い、構造物に致命的な損傷を与える代表的な流体構造連成問題としてのロックイン現象や渦励振による共振状態を検証し、移動境界の流体構造連成解析における本発明の解析方法の有効性を示す。

#### 4. 1 基礎方程式

円柱の振動計算に関しては、弾性支持された剛体構造物として、流れ方向に対して直角方向に振動する1質点1自由度系モデルを仮定している。

円柱が強制振動の場合には、円柱を一様流と直角な方向（Y方向）にsin波で強制的に振動させる。即ち円柱中心のY方向の変位を[数9]の式（17）で与える。ここで、Aは振幅、fcは強制振動周波数、tは時間である。

また、円柱表面のY方向の速度境界条件は、[数9]の式（18）で与えられる。

円柱が渦放出による自励振動をする場合には、有次元の振動方程式は1質点1自由度のダンパ・ばねモデルによって[数9]の式（19）に示す。

式（19）の中でそれぞれmは円柱の質量、cはダンパの粘性減衰係数、kはバネの弾性回復係数、 $\rho$ は流体の密度、 $U_0$ は一様流の流速、Dは円柱の直径、 $C_L$ は揚力係数である。式（19）を無次元化して円柱の固有振動数 $f_0 = (k/m)^{0.5} / (2\pi)$ 、無次元減衰係数 $h = c / (2(mk)^{0.5})$ 、スクルート

ン数  $Sc = 2\pi h (2\rho_e / \rho)$  などの振動応答を支配するパラメータで整理すると、[数9]の式(20)になる。

【数9】

$$y = A \sin(2\pi f_e t) \quad (17)$$

$$v_w = A 2\pi f_e \cos(2\pi f_e t) \quad (18)$$

$$m \frac{d^2 \bar{y}}{dt^2} + c \frac{d\bar{y}}{dt} + k\bar{y} = \frac{1}{2} \rho U_o^2 D C_L \quad (19)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + (4\pi h f_e) \frac{dy}{dt} + (2\pi f_e)^2 y = \frac{8h}{Sc} C_L \quad (20)$$

5

#### 4. 2 数値解法

円柱が振動する場合には、式(18)または式(20)から求められた振動する円柱の運動速度を、流れ場の速度境界条件として計算時間ステップごとに変化して与えている。

- 10 円柱の渦自励振動の解析については、円柱の初期変位と初期速度を0として、式(20)の振動方程式をニューマークのβ法により積分し、円柱の振動変位や振動速度を求められる。

- 15 本発明の流体構造連成解析は、流体系と構造系を連立して統一的に扱う強連成ではなく、流体と構造の方程式を別々に離散化し、それぞれの境界条件を陽的に受け渡す弱連成となる。複雑な流体構造系の連成解析における時間刻みは、特に強連成の場合、流体または構造計算の時間刻みの小さい方に制約されることは原則であるが、本発明での構造系の計算には単純なダンパ・バネモデルを用いるため、計算の時間刻みは流体解析のCFL条件のみから決められる。また、ニューマークのβ法により将来の加速度を積分する際に、式(20)の揚力は現在の値  
20 を用いて陽的に与える。

#### 4. 3 強制振動円柱まわりの流れ

流れ場のレイノルズ数  $Re = 1000$  の場合には、3.2の解析条件のままで、

式(17)と式(18)による強制振動円柱まわりの流れ解析を行った。レイノルズ数  $Re = 1000$  の際に、静止円柱の無次元渦放出周波数の Strouhal 数は  $St = 0.2$  位であることが実験値で知られている。強制振動の計算条件として振幅  $A$  を  $0.1$ 、強制振動周波数を  $0.2$  に中心として  $fc = 0.05$ 、  
5  $0.1$ 、 $0.15$ 、 $0.2$ 、 $0.25$ 、 $0.3$ 、 $0.4$ 、 $0.5$  の 8 ケースで計算を行なった。静止円柱を含めて各振動数での円柱に作用する流体力の抗力係数  $C_D$  および揚力係数  $C_L$  の時間履歴の変動波形をそれぞれ図 19 A~I に示す。

図 19 A~I の抗力係数と揚力係数の時間履歴波形図から、振動周波数  $fc =$   
10  $0.5$  を除いて、振動する円柱に作用する抗力および揚力が静止円柱のものより大きいことが分かった。

揚力の変動波により求められた流れの渦放出状態を表わす Strouhal 数  $St$  と強制振動周波数  $fc$  の関係を図 20 に示す。Strouhal 数  $0.2$  付近の  $0.15 < fc < 0.25$  における  $fc/St = 1$  の計算結果から、強制振  
15 動による渦放出周波数のロックイン現象がよく再現されていることが分かった。また、図 19 A~I からロックイン領域での抗力や揚力が増大することも捉えている。

本発明と Okamoto らの実験[非特許文献 18]とはレイノルズ数 ( $Re =$   
19000) や円柱振動振幅 ( $A = 0.05$ ) と異なるが、Okamoto ら  
20 の実験による  $0.186 < fc < 0.216$  のロックイン範囲は本発明のロックイン領域に含まれることが確認された。

#### 4. 4 円柱の渦放出による自励振動

4. 3 の解析条件で、ニューマークの  $\beta$  法により式(20)の振動方程式を積  
25 分し、円柱の渦自励振動の振動変位や振動速度を求める。円柱の振動速度をさらに流れ場の速度境界条件として課する。流れ場のレイノルズ数  $Re$  を  $10000$ 、スクルートン数  $Sc$  を  $5$ 、減衰係数  $h$  を  $1\%$ 、無次元流速  $Vr = U_0/(foD)$  を  $2$ 、 $3$ 、 $4$ 、 $5$ 、 $6$ 、 $7$ 、 $8$  の七ケースで計算を行い、各々の無次元流速に対する抗力係数  $C_D$ 、揚力係数  $C_L$ 、そして変位  $y$  の時間履歴を図 21 A~C と図 22 D~

Gに示す。

図 2 1 A～Cと図 2 2 D～Gに示された円柱の渦励振解析について、流れ方向に対して直角方向に振動する弾性支持された剛体構造物の 1 質点 1 自由度系モデルを仮定しているが、図 2 1 A～Cと図 2 2 D～Gの計算結果から分かるように、

- 5 式 (20) の振動方程式の右辺の揚力  $C_L$  項は、非定常な渦放出により不規則的な変化を呈している。そして流体構造の連成運動としてさらに振動円柱が流れ場に非定常な擾乱をも与えているため、4. 3 の  $\sin$  強制振動に比べて、渦励振による揚力と抗力の平均値は、静止円柱のものより増大することが一致しているものの、その時刻歴変化曲線はもっと不規則的な波形となっていることが見られる。また無次元流速  $V_r = 4$  (円柱の固有振動数  $f_o = 1/4 = 0.25$ ) の場合
- 10 に円柱の振幅がもっとも大きくなることが分かった。これは静止円柱の流れ場の Strouhal 数  $St = 0.25$  にも関連すると考えられる。

- 各々の無次元流速  $V_r$  に対する  $y$  の最大変位を整理して図 2 3 に示す。最大変位  $y$  についてみると、 $V_r = 2, 3, 4$  では  $y$  の最大変位は次第に大きくなり、
- 15  $V_r = 4$  で最大になる。その後、 $V_r$  が大きくなるにつれて、 $y$  の最大変位は波状に小さくなっていく。本計算での渦励振応答振幅の変化傾向は、近藤[非特許文献 19]の ALE 有限要素法による計算結果と定性的に一致していると確認された。

## 20 5. 結論

- (1) V-CAD データを直接利用する流体解析方法を開発し、内部流・外部流ともにベンチマークテストを用いて検証した。その結果、本発明で提案した流体解析方法は十分な安定性を有し、二次元静止円柱まわりの流れの計算では、従来のボクセル法より良く、境界適合格子と比べて遜色がない計算精度を持つことが
- 25 検証された。

(2) 流れ場の形状に関しては、どんな複雑な形状があっても、V-CAD データさえを読み込めば、短時間で直接二次元の非圧縮性粘性流れの数値シミュレーションができるようになった。

(3) 二次元円柱の流体構造連成振動の計算では、円柱まわり流れのレイノルズ



数  $Re = 1000$  の場合に、円柱の強制振動によるロックイン ( $f_c / St = 1$ ) 領域は  $0.15 < f_c < 0.25$  であることが予測された。

また、レイノルズ数  $Re = 10000$  かつ無次元流速  $V_r = 4$  の時、つまり、円柱固有振動数 ( $f_o = 1/4$ ) が静止円柱の *Strouhal* 数 ( $St = 0.25$ ) と等しくなる時に、渦自励振動による共振状態が起こることが示された。

5     これらの計算結果は、実験データや *ALE* 有限要素法による結果と定性的に一致している。したがって、移動境界の流体構造連成問題においても、提案した流体解析方法の有効性が示されたと言える。

これらの計算結果は、実験データや *ALE* 有限要素法による結果と定性的に一致している。したがって、移動境界の流体構造連成問題においても、提案した流体解析方法の有効性が示されたと言える。

#### 【発明の効果】

10    上述したように、次世代 *CAD* として期待されている *V-CAD* ボクセルデータを直接利用する任意形状の非圧縮粘性流れ場の数値解析方法の開発を行った。流れ場の境界には、*VOF* 法を併用したカットセル有限体積法を用いた。二次元のチャンネル内流れと円柱まわり流れを用いて調べた結果、この方法はある程度の精度と安定性を有し、計算コストがあまりかからない実用計算方法であることが分かった。

15    従って、本発明の *V-CAD* データを直接用いた非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法と装置は、格子生成を完全に自動化することができ、物体境界の表現が容易であり、比較的簡単な計算処理により、精度の高いシミュレーションを短時間で行うことができる等の優れた効果を有する。

## 請求の範囲

1. 非圧縮性粘性流体と接する対象物の境界データからなる外部データ(12)を境界が直交する複数のセル(13)に分割する分割ステップ(A)と、

5 分割された各セルを対象物の内側に位置する内部セル(13a)と境界データを含む境界セル(13b)とに区分するセル区分ステップ(B)と、

前記境界データによる境界セル(13b)の稜線の切断点を求める切断点決定ステップ(C)と、

10 求めた切断点を結ぶ多角形を境界面のセル内部データとする境界面決定ステップ(D)と、

流れ場の境界に、VOF法を併用したカットセル有限体積法を適用して解析する解析ステップ(E)と、を備えたことを特徴とするV-CADデータを直接用いた非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法。

2. 前記解析ステップ(E)において、空間積分について、対流項に二次元のQUICK補間スキームを使用し、拡散項に二次精度の中心差分を用い、時間進行について、対流項と拡散項を合わせて二次精度のAdams-Bashforth法を適用し、圧力勾配項に一次精度のEuler陰解法を用いる、ことを特徴とする請求項1に記載の非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法。

3. 二次元境界セルにおいて、有限体積法における支配方程式を[数1]の式(7)であらわす、

【数1】

$$\iint_{V_{i,j}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} dV = - \iint_{V_{i,j}} \text{div}(\bar{u} \otimes \bar{u}) dV - \iint_{V_{i,j}} \text{div}(p\bar{I}) dV + \frac{1}{\text{Re}} \iint_{V_{i,j}} \text{div}(\text{grad}(\bar{u})) dV \quad (7)$$

ことを特徴とする請求項2に記載の非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法。

4. 有限体積法における支配方程式における対流項、圧力勾配項および拡散項を[数2]の式(8)、(9)、(10)であらわす、

【数2】

対流項：

$$\begin{aligned}
 \iint_{V_{i,j}} \text{div}(\bar{u} \otimes \bar{u}) dV &= \oint_{S_{i-5}} (\bar{u} \otimes \bar{u}) \cdot \bar{n} dS = \sum_{m=1-5} (\bar{u} \otimes \bar{u})_m \cdot \bar{n} \delta S_m \\
 &= [\Delta y (B_{i,j} u_{i,j}^{(x)} - B_{i-1,j} u_{i-1,j}^{(x)}) \\
 &\quad + \Delta x (A_{i,j} u_{i,j+1/2}^{(y)} - A_{i,j-1} u_{i,j-1/2}^{(y)})] \bar{i} \\
 &\quad + [\Delta y (B_{i,j} v_{i,j+1/2}^{(x)} - B_{i-1,j} v_{i-1,j+1/2}^{(x)}) \\
 &\quad + \Delta x (A_{i,j} v_{i,j}^{(y)} - A_{i,j-1} v_{i,j-1}^{(y)})] \bar{j} \quad \text{only no-slip on wall}
 \end{aligned} \quad (8)$$

圧力勾配項：

$$\begin{aligned}
 \iint_{V_{i,j}} \text{div}(p \bar{I}) dV &= \oint_{S_{i-5}} (p \bar{I}) \cdot \bar{n} dS = \sum_{m=1-5} p_m \bar{I} \cdot \bar{n} \delta S_m \\
 &= \Delta y [B_{i,j} p_{i+1/2,j} - B_{i-1,j} p_{i-1/2,j} - p_p (B_{i,j} - B_{i-1,j})] \bar{i} \\
 &\quad + \Delta x [A_{i,j} p_{i,j+1/2} - A_{i,j-1} p_{i,j-1/2} - p_p (A_{i,j} - A_{i,j-1})] \bar{j}
 \end{aligned} \quad (9)$$

拡散項：

$$\begin{aligned}
 \iint_{V_{i,j}} \text{div}(\text{grad}(\bar{u})) dV &= \oint_{S_{i-5}} \text{grad}(\bar{u}) \cdot \bar{n} dS = \sum_{m=1-5} \text{grad}(\bar{u})_m \cdot \bar{n} \delta S_m \\
 &= [\Delta y (B_{i,j} \text{grad}(u)_{i+1/2,j}^x - B_{i-1,j} \text{grad}(u)_{i-1/2,j}^x - (B_{i,j} - B_{i-1,j}) \text{grad}(u)_p^x) \\
 &\quad + \Delta x (A_{i,j} \text{grad}(u)_{i,j+1/2}^y - A_{i,j-1} \text{grad}(u)_{i,j-1/2}^y - (A_{i,j} - A_{i,j-1}) \text{grad}(u)_p^y)] \bar{i} \\
 &\quad + [\Delta y (B_{i,j} \text{grad}(v)_{i+1/2,j}^x - B_{i-1,j} \text{grad}(v)_{i-1/2,j}^x - (B_{i,j} - B_{i-1,j}) \text{grad}(v)_p^x) \\
 &\quad + \Delta x (A_{i,j} \text{grad}(v)_{i,j+1/2}^y - A_{i,j-1} \text{grad}(v)_{i,j-1/2}^y - (A_{i,j} - A_{i,j-1}) \text{grad}(v)_p^y)] \bar{j}
 \end{aligned} \quad (10)$$

ことを特徴とする請求項 3 に記載の非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法。

5. 固体境界の積分において、固体境界でノースリップ境界条件の場合に、対流項は零とし、圧力勾配項と拡散項に対しては、切断線の間中点 P の値を平均値として用いて積分し、空間積分に対してはすべての項に開口率を適用する、こ

5 ことを特徴とする請求項 3 に記載の非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法。

6. カットセルにおいて算出される物理変数の定義点を、VOF = 0.01 を閾値としてそれより小さい境界セルは完全な固体とみなし、それより大きい境界セルにおいて算出される変数をセルの中心に置く、また、稜線の変数定義点をセル稜線の中心に定義し、更に、線分 4 の中心点の変数値を線形補間により求める、ことを特徴とする請求項 3 に記載の非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法。

10

7. 物体に働く抗力（流れ方向の力）と揚力（流れの垂直方向の力）を、  
[数 3] の式 (12) (13) であらわす、

【数 3】

抗力：

$$\begin{aligned}
 F_x = F_D &= \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \right) dx dy \\
 &= \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \right) dx dy + \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \right) dy dx = \oint_S \sigma_{xx} ds + \oint_S \sigma_{xy} ds \\
 &= \int_{y_1}^{y_2} (\sigma_{xx}|_{f_1(y)} - \sigma_{xx}|_{f_2(y)}) dy + \int_{x_1}^{x_2} (\sigma_{xy}|_{g_1(x)} - \sigma_{xy}|_{g_2(x)}) dx \Big|_{\text{only Cartesian}}
 \end{aligned} \tag{12}$$

揚力：

$$\begin{aligned}
 F_y = F_L &= \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \right) dx dy \\
 &= \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} \right) dx dy + \iint_V \left( \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \right) dy dx = \oint_S \sigma_{yx} ds + \oint_S \sigma_{yy} ds \\
 &= \int_{y_1}^{y_2} (\sigma_{yx}|_{f_1(y)} - \sigma_{yx}|_{f_2(y)}) dy + \int_{x_1}^{x_2} (\sigma_{yy}|_{g_1(x)} - \sigma_{yy}|_{g_2(x)}) dx \Big|_{\text{only Cartesian}}
 \end{aligned} \tag{13}$$

5 ことを特徴とする請求項 3 に記載の非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法。

8. 移動境界を伴う流体構造連成解析において、所定の時間刻み毎に、流体系と構造系を別々に解析し、それぞれの境界条件を陽的に受け渡す、ことを特徴とする請求項 3 に記載の非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法。

9. 円柱の強制振動解析において、円柱が弾性支持された剛体構造物として、流れ方向に対して直角方向に振動する 1 質点 1 自由度系モデルと仮定し、円柱中心の Y 方向の変位を式 (17) で与え、円柱表面の Y 方向の速度境界条件を、式 (18) で与える、

$$y = A \sin(2\pi f_c t) \tag{17}$$

$$v_w = A 2\pi f_c \cos(2\pi f_c t) \tag{18}$$

15 ことを特徴とする請求項 8 に記載の非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法。

10. 式(18)から求められた振動する円柱の運動速度を、流れ場の速度境界条件として計算時間ステップごとに変化して与える、ことを特徴とする請求項9に記載の非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法。

11. 円柱の渦放出による自励振動解析において、有次元の振動方程式を  
5 1 質点1自由度のダンパ・ばねモデルとて、式(19)又は式(20)であらわす、

$$m \frac{d^2 \bar{y}}{dt^2} + c \frac{d\bar{y}}{dt} + k\bar{y} = \frac{1}{2} \rho U_o^2 D C_L \quad (19)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + (4\pi h f_o) \frac{dy}{dt} + (2\pi f_o)^2 y = \frac{8h}{Sc} C_L \quad (20)$$

ことを特徴とする請求項8に記載の非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法。

12. 式(20)から求められた振動する円柱の運動速度を、流れ場の速度境界条件として計算時間ステップごとに変化して与える、ことを特徴とする請求項11に記載の非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法。

13. 円柱の初期変位と初期速度を0とし、かつ式(20)の揚力は現在の値を用いて陽的に与え、式(20)の振動方程式をニューマークのβ法により積分し、円柱の振動変位と振動速度を求める、ことを特徴とする請求項11に記載の非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析方法。

14. 非圧縮性粘性流体と接する対象物(1)の境界データからなる外部データ(12)を入力する入力装置(2)と、形状と物理量を統合した実体データとその記憶演算プログラムを記憶する外部記憶装置(3)と、前記記憶プログラムを実行するための内部記憶装置(4)及び中央処理装置(5)と、実行結果  
20 を出力する出力装置(6)とを備え、

前記外部データを境界が直交する複数のセル(13)に分割し、分割された各セルを対象物の内側に位置する内部セル(13a)と境界データを含む境界セル(13b)とに区分し、前記境界データによる境界セル(13b)の稜線の切断点を求め、求めた切断点を結ぶ多角形を境界面のセル内部データとし、流れ場の  
25 境界に、VOF法を併用したカットセル有限体積法を適用して解析する、ことを特徴とするV-CADデータを直接用いた非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析

装置。

15. コンピュータに、非圧縮性粘性流体と接する対象物の境界データからなる外部データ(12)を境界が直交する複数のセル(13)に分割する分割ステップ(A)と、

5 分割された各セルを対象物の内側に位置する内部セル(13a)と境界データを含む境界セル(13b)とに区分するセル区分ステップ(B)と、

前記境界データによる境界セル(13b)の稜線の切断点を求める切断点決定ステップ(C)と、

10 求めた切断点を結ぶ多角形を境界面のセル内部データとする境界面決定ステップ(D)と、

流れ場の境界に、VOF法を併用したカットセル有限体積法を適用して解析する解析ステップ(E)と、を実行させるための非圧縮性粘性流体の流れ場の数値解析プログラム。

図1

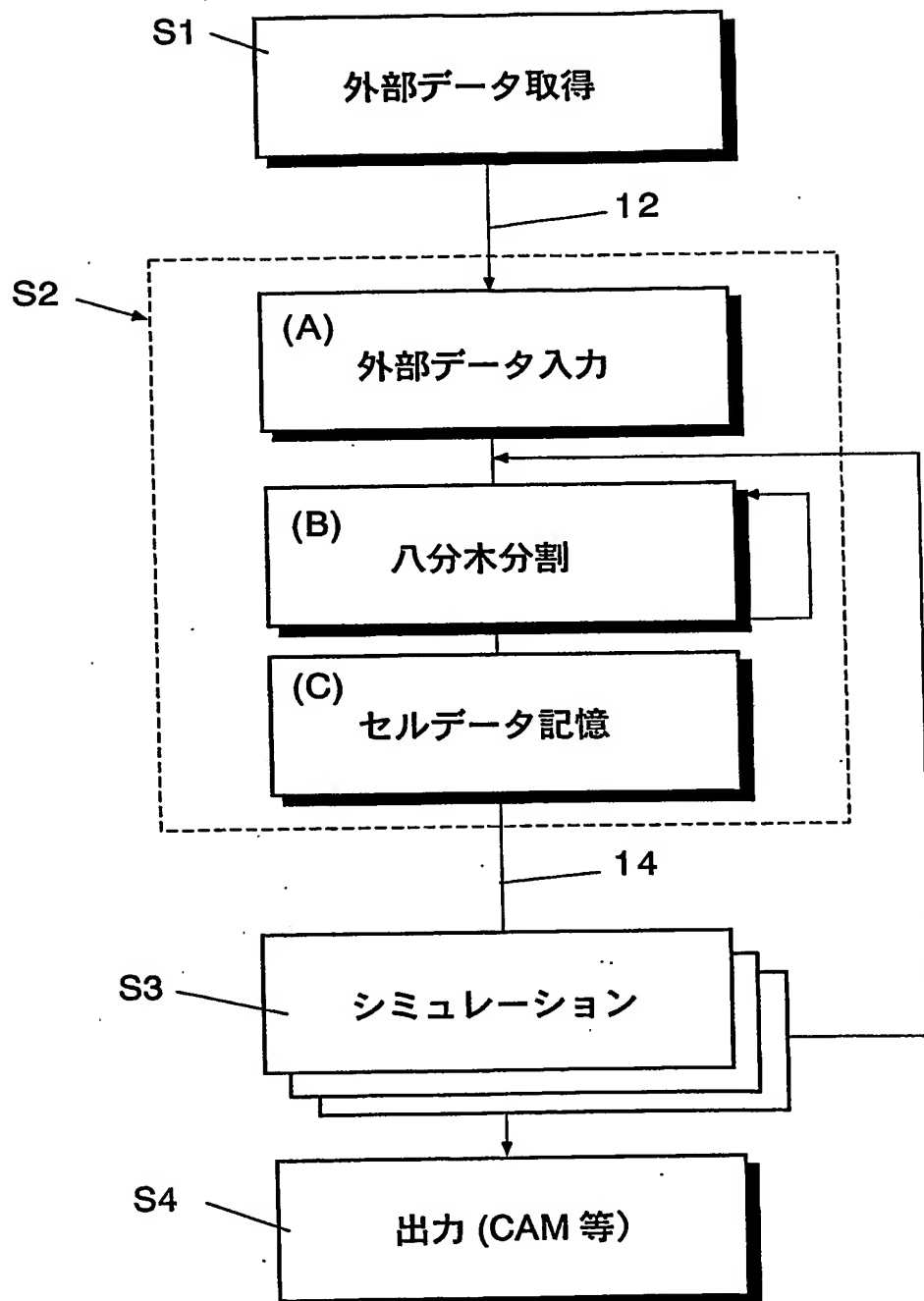
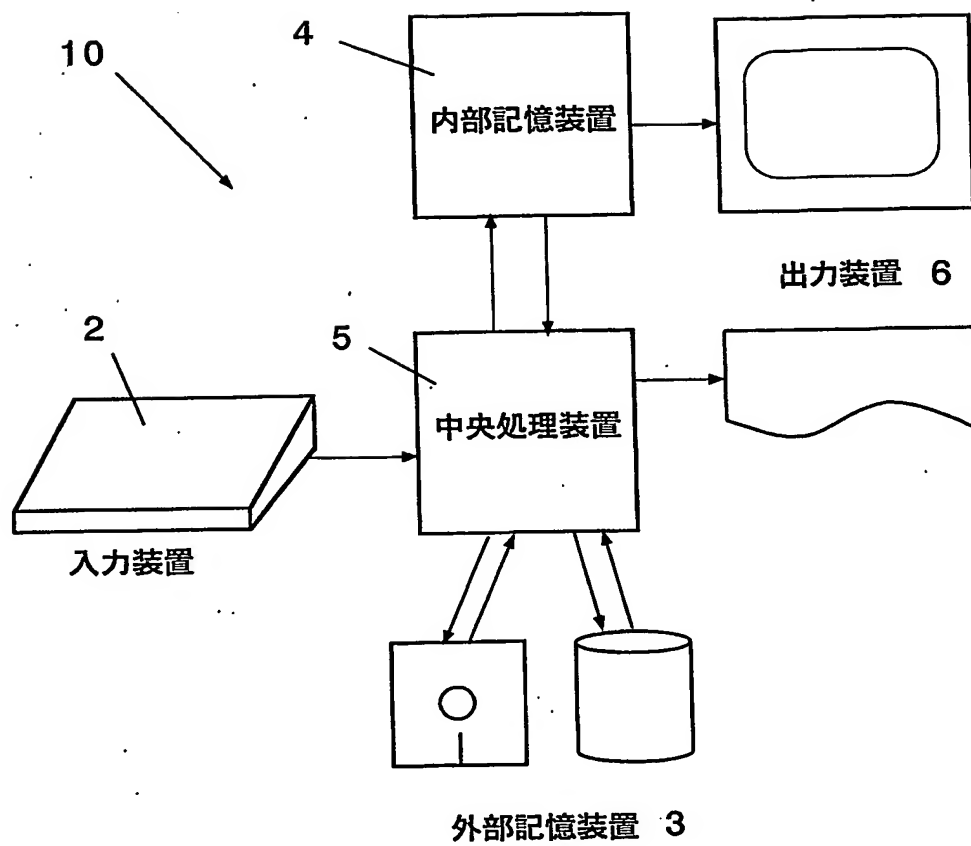


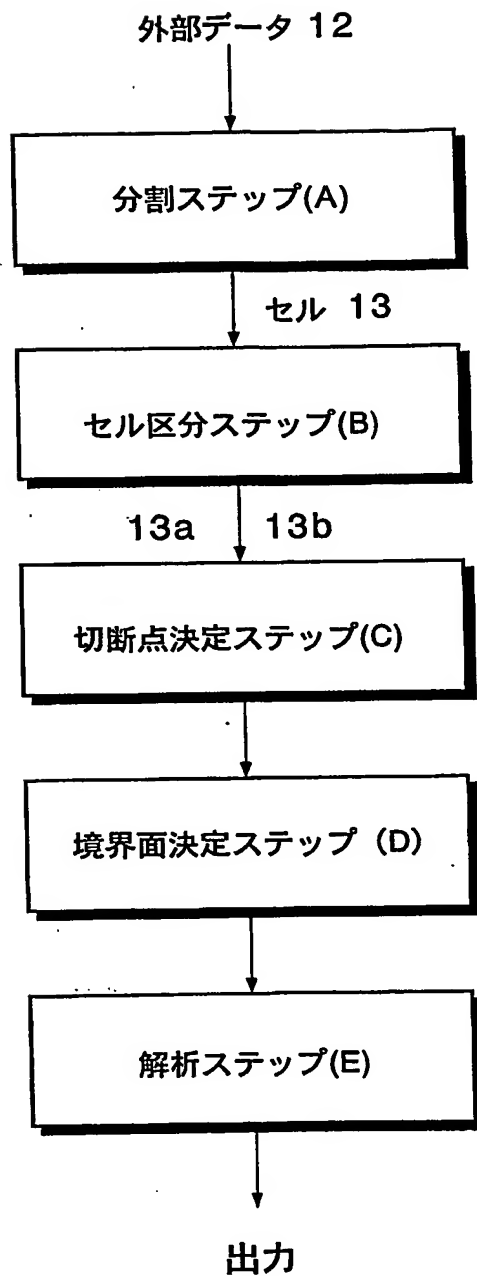
図2





3/19

図3



4/19

図4A

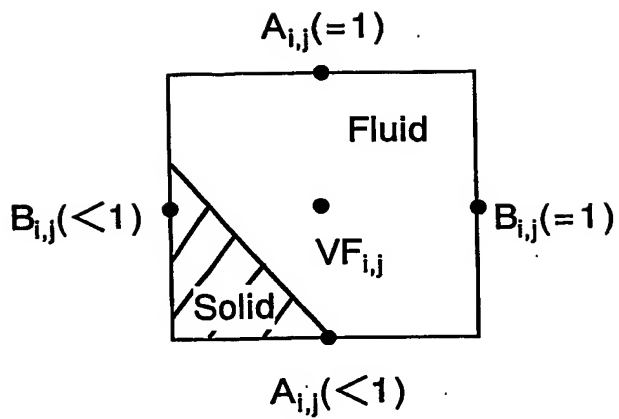
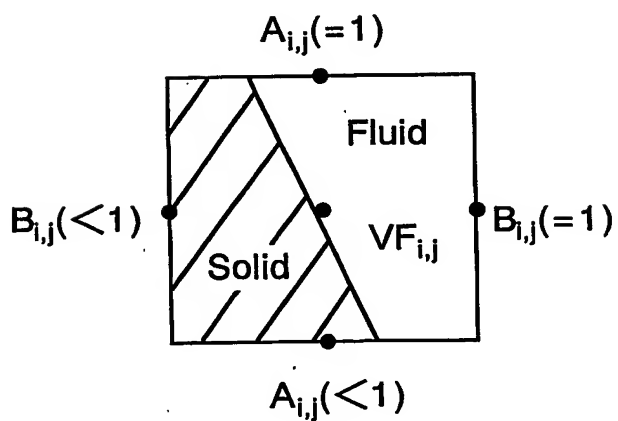


図4B



5/19

図5

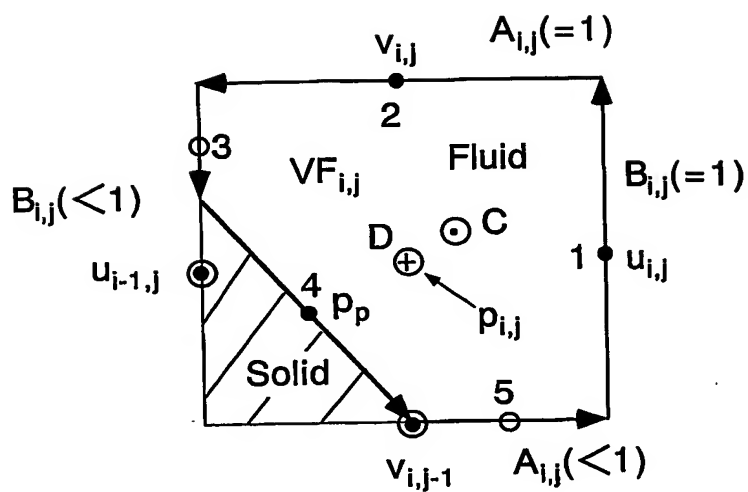


図6A

0度

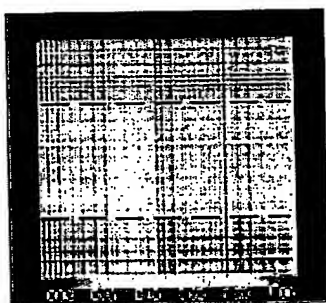


図6B

10度

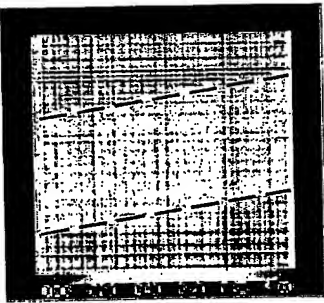
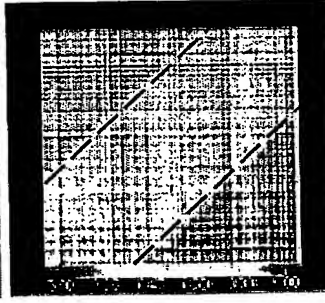


図6C

45度



6/19

角度0

図7A

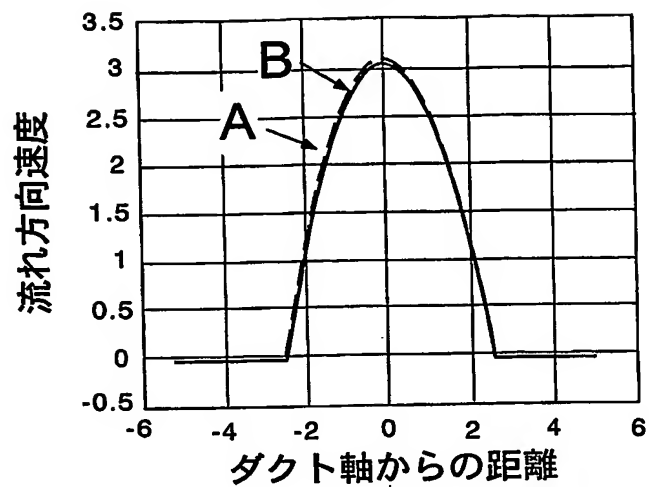


図7B

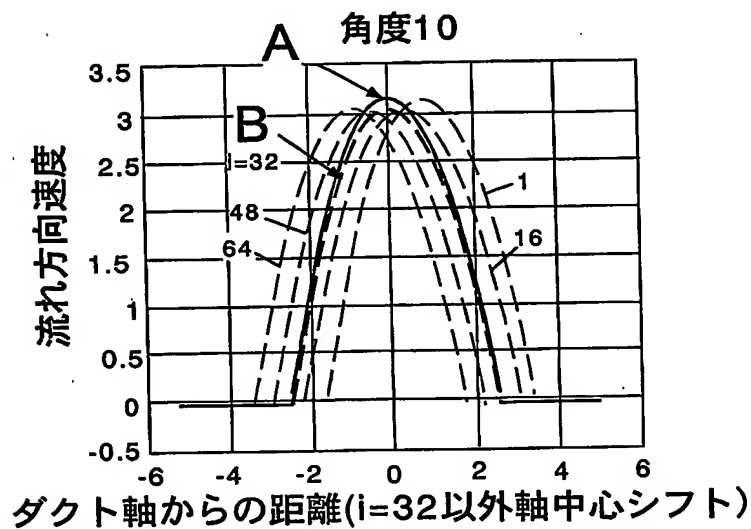


図7C

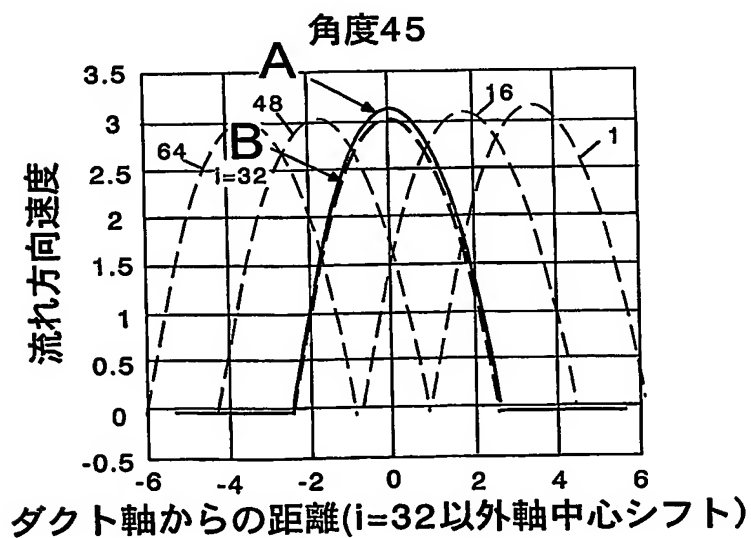


図8

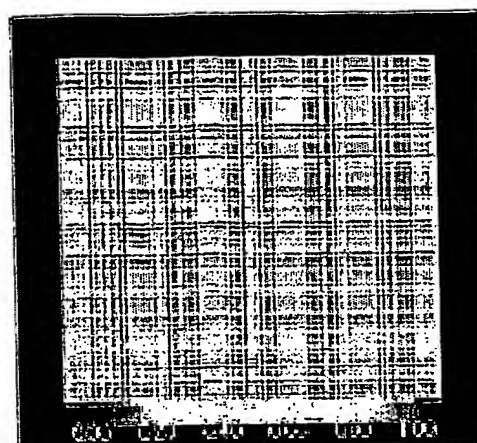


図9

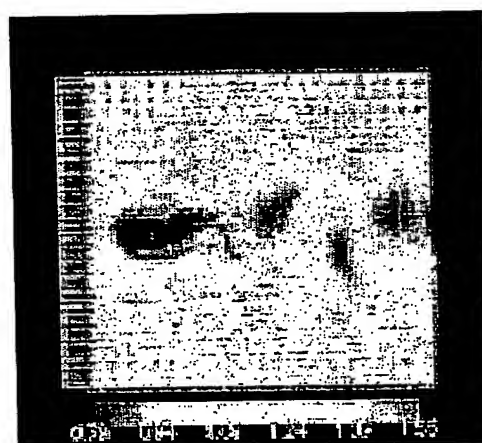
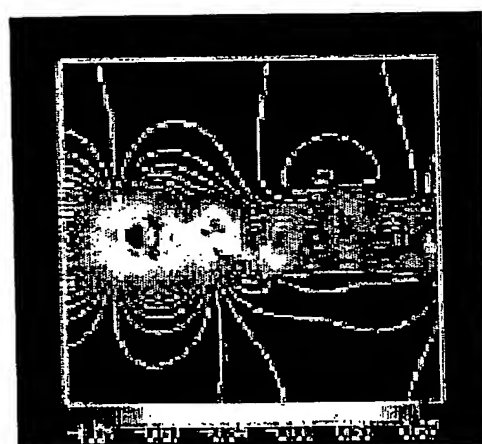


図10



8/19

図11

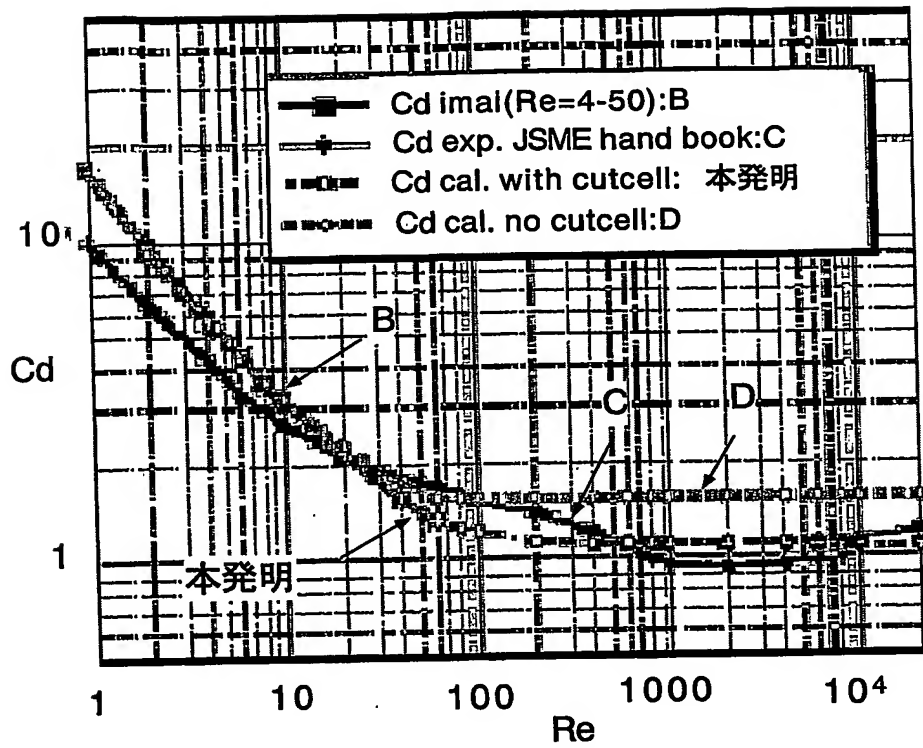
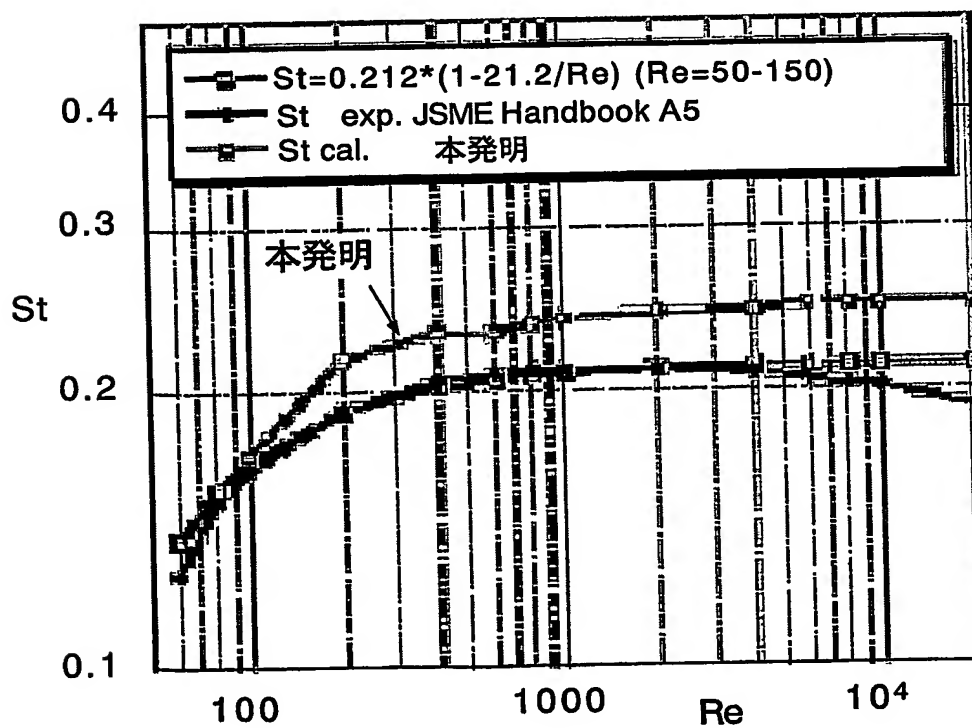


図12



9/19

図13A

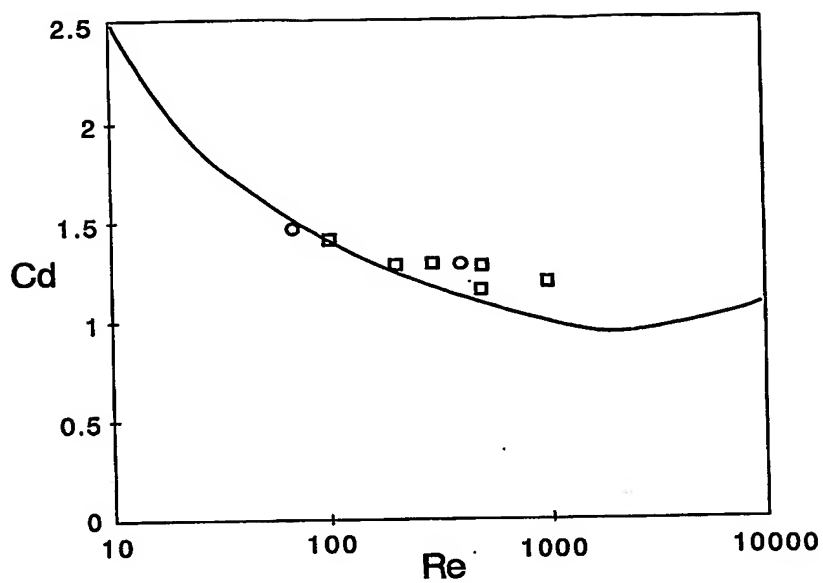
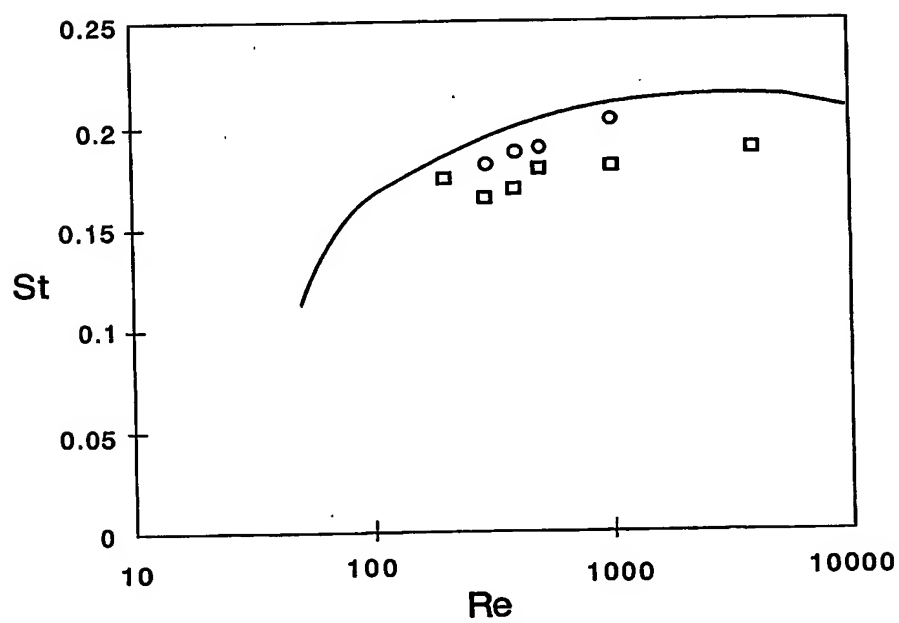


図13B



10/19

図14A

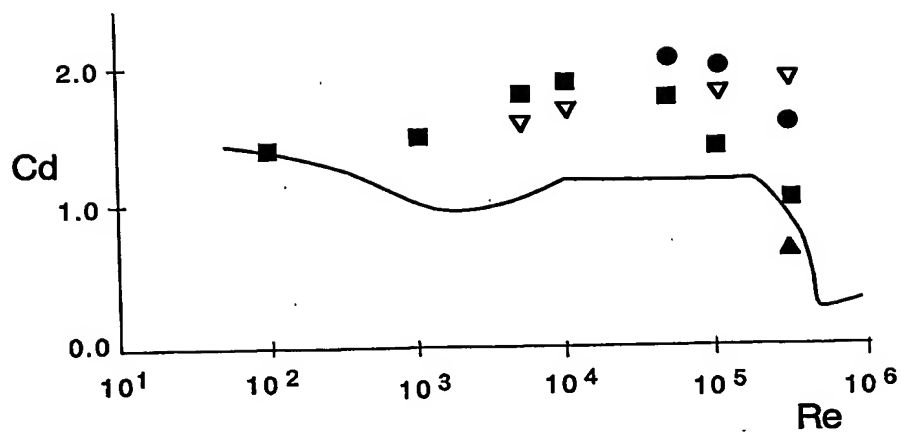


図14B

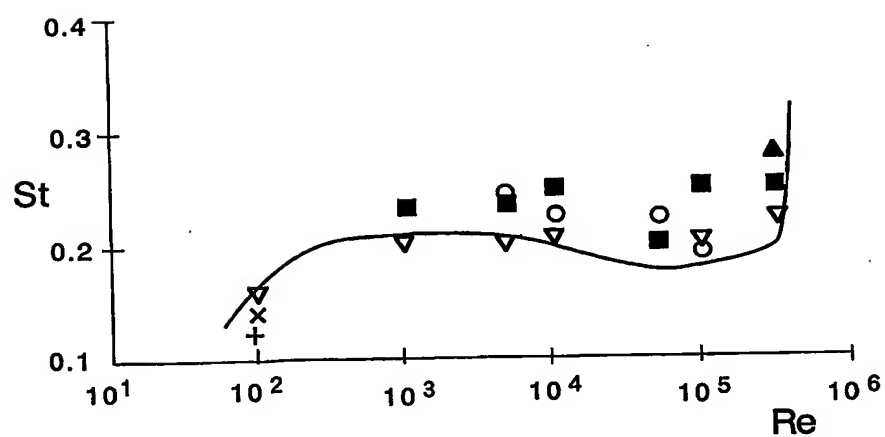




図15A

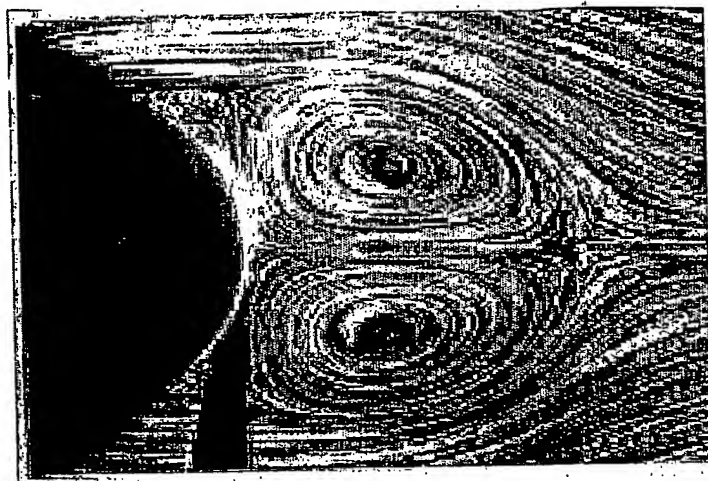
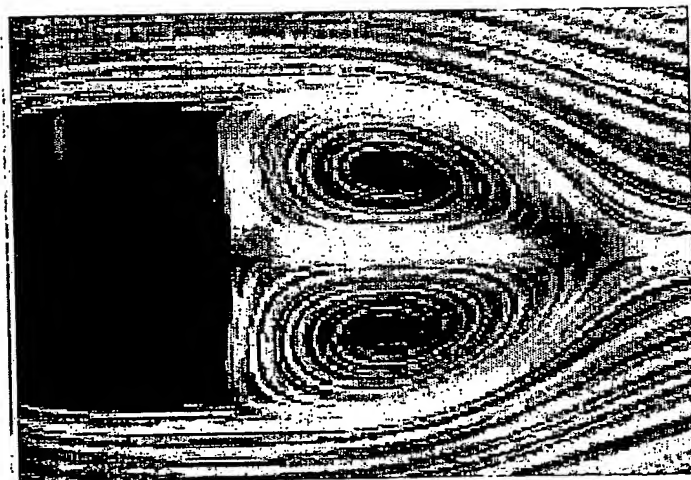


図15B



12/19

図16A

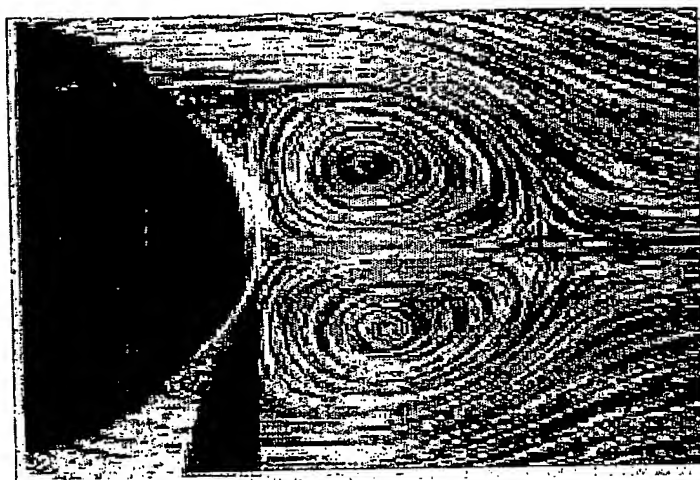
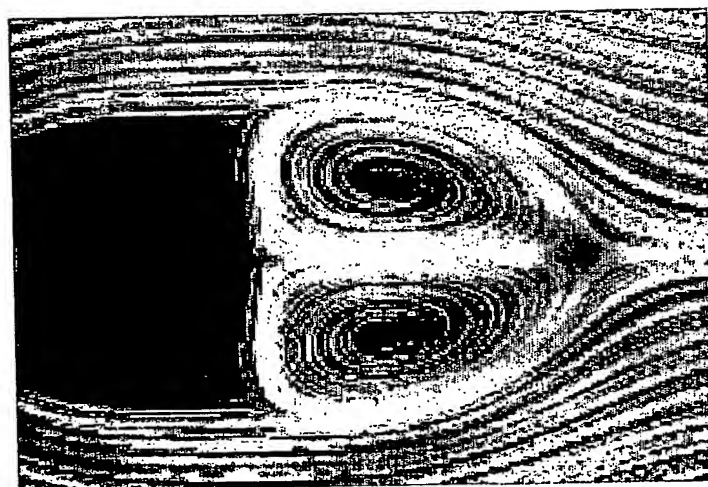


図16B



13/19

図17A

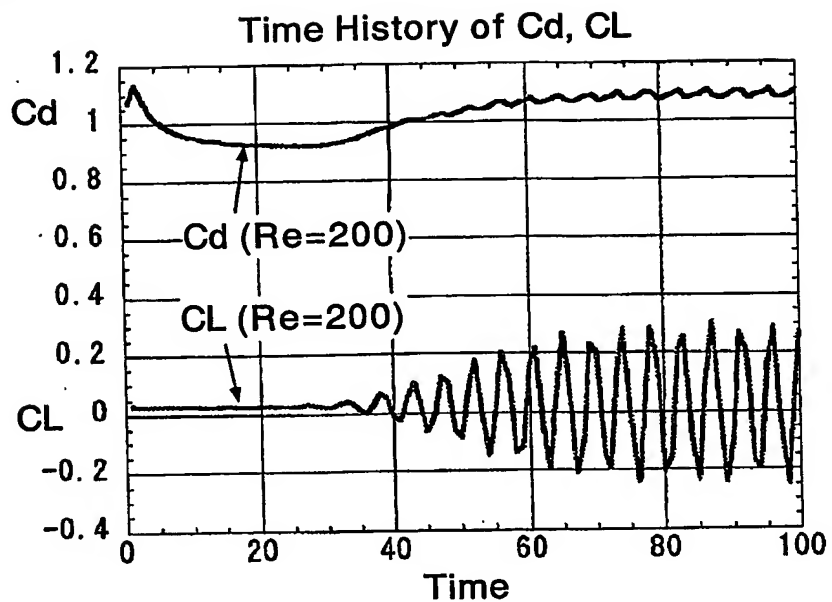


図17B

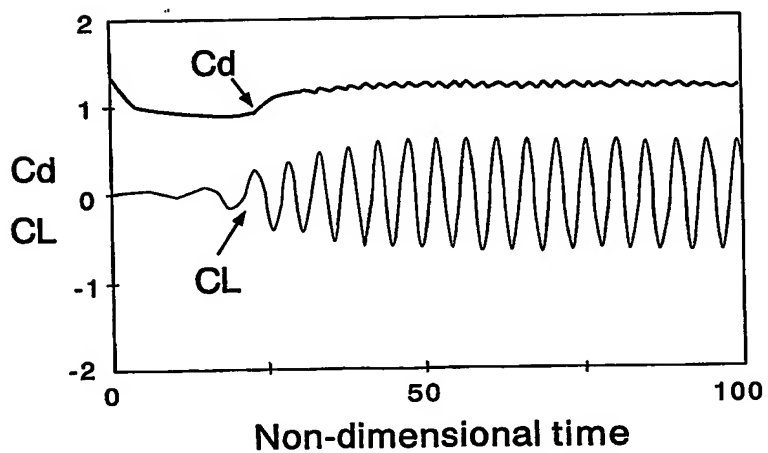


図18A

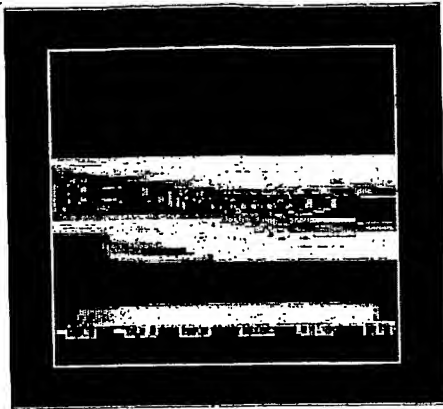


図18B

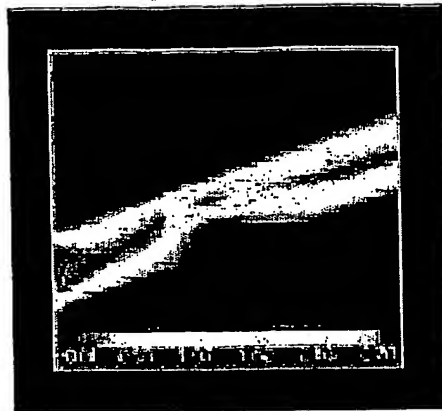


図18C

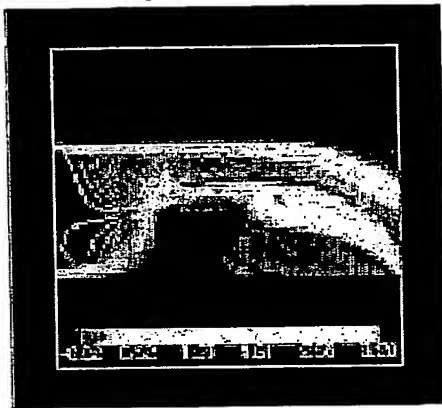


図18D

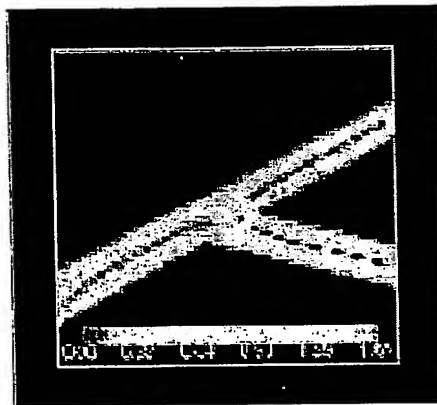


図18E

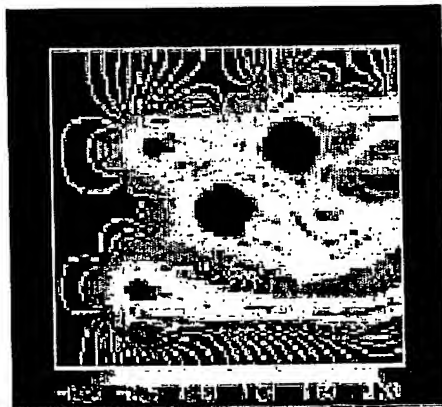
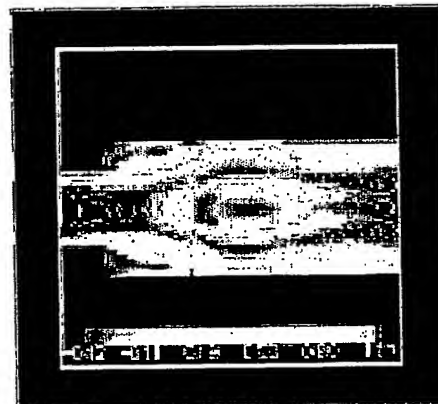


図18F



15/19

図19A

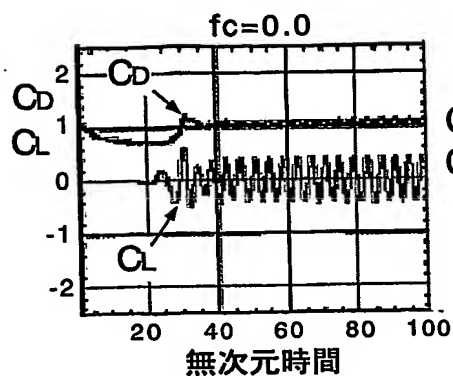


図19B

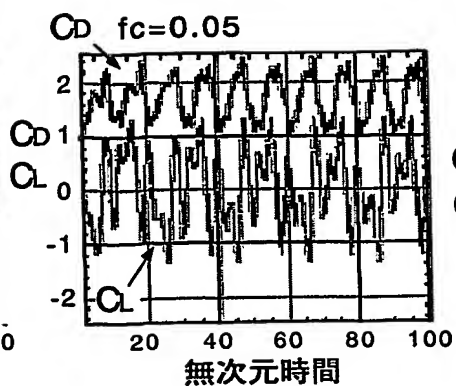


図19C

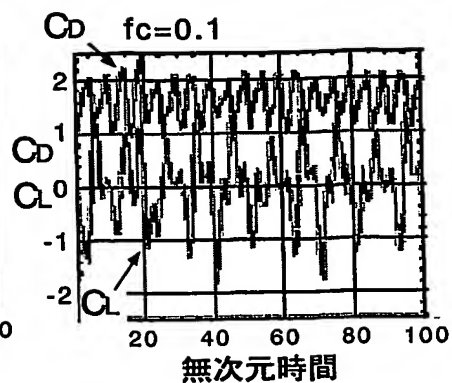


図19D

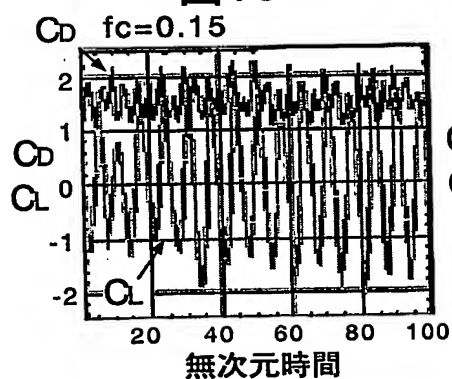


図19E

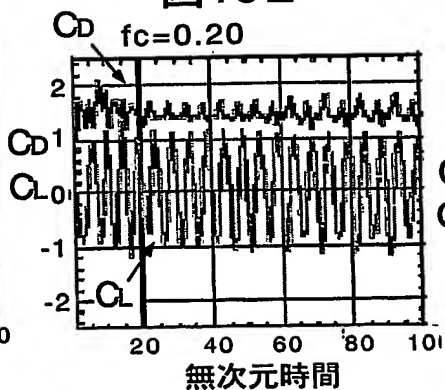


図19F

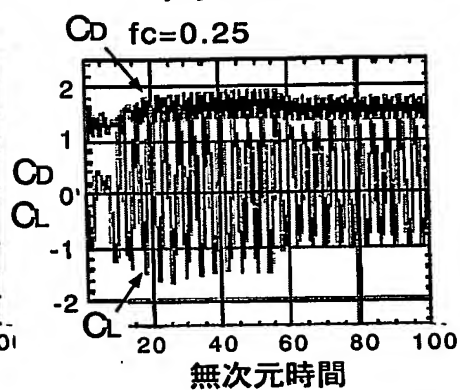


図19G

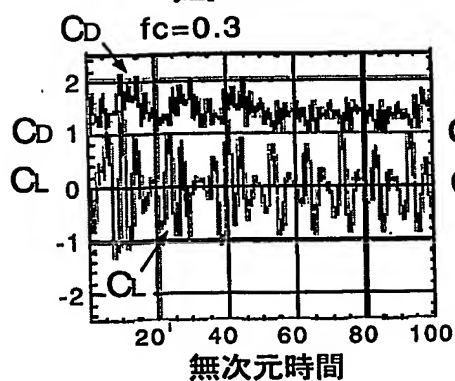


図19H

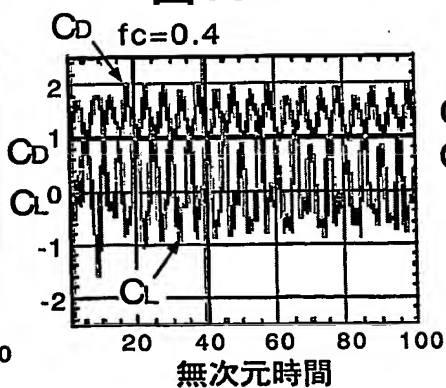
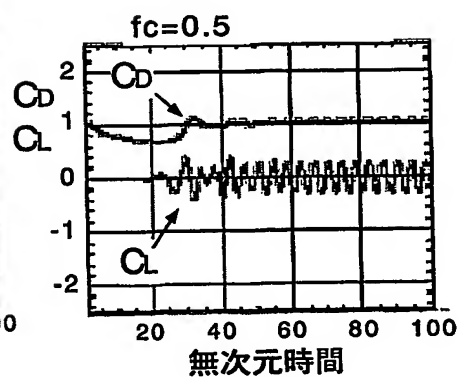
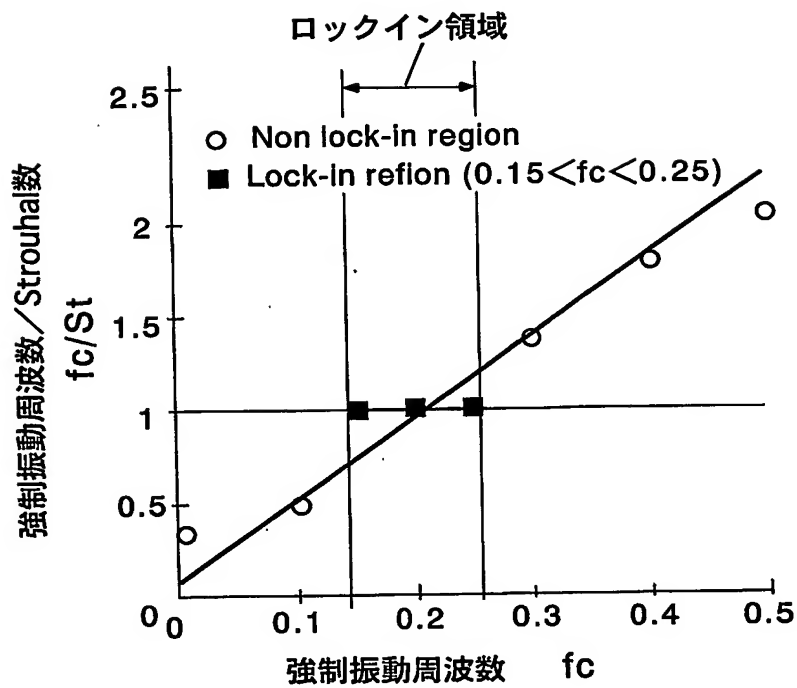


図19I



16/19

図20



17/19

図21A-1

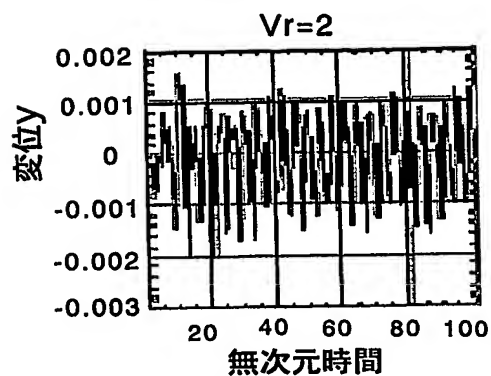


図21A-2

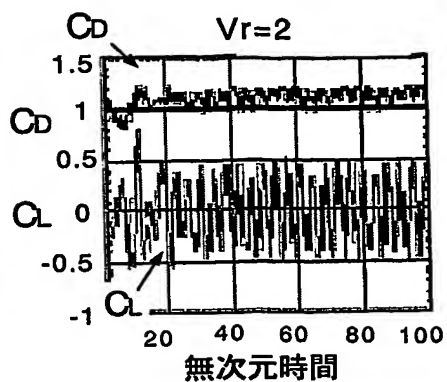


図21B-1

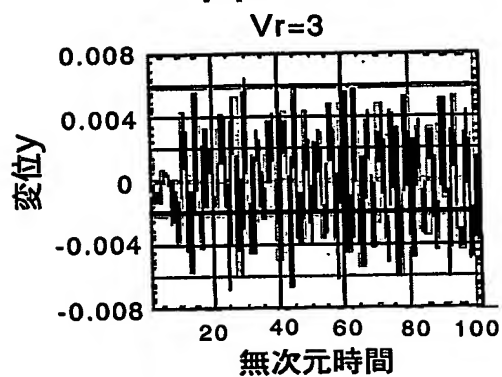


図21B-2

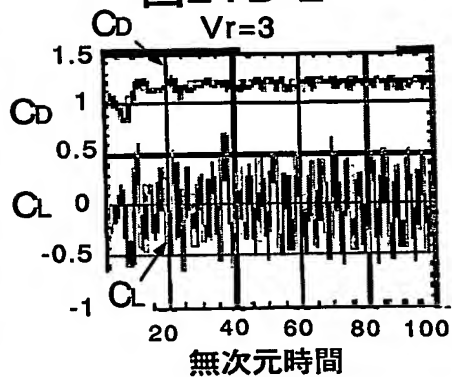


図21C-1

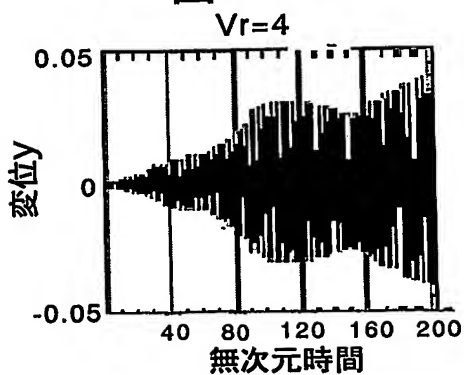
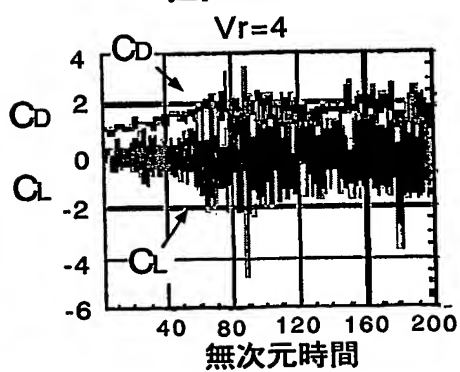


図21C-2



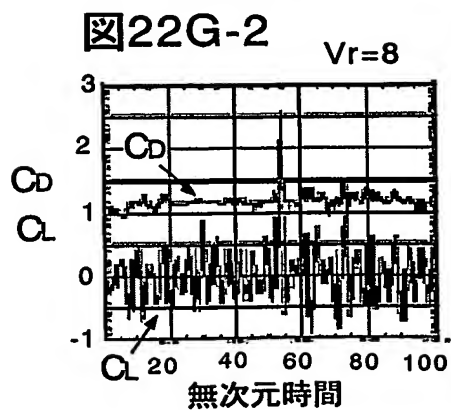
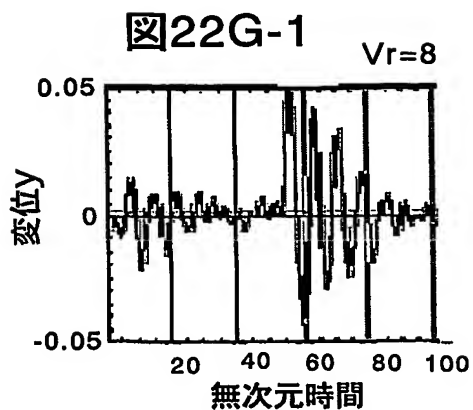
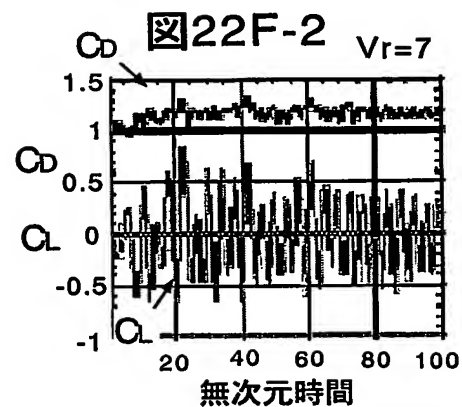
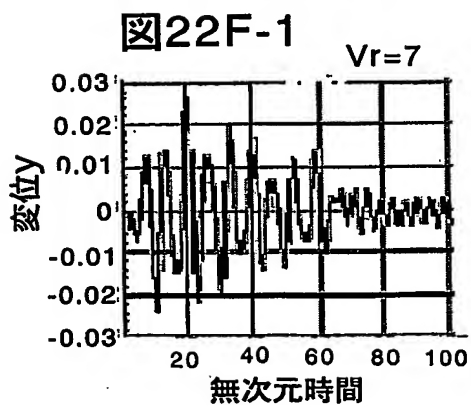
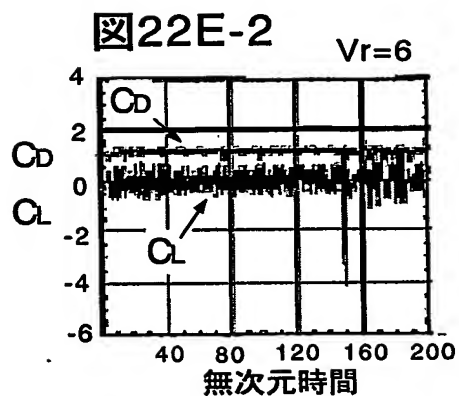
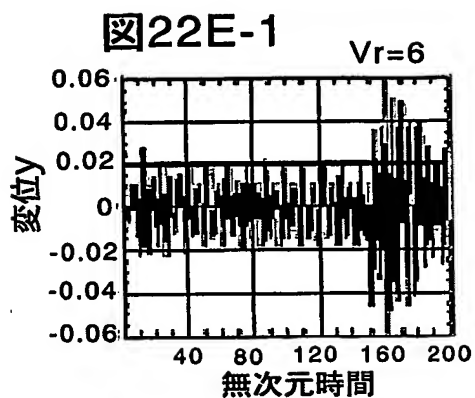
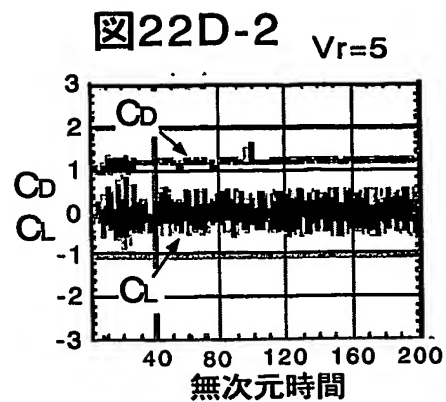
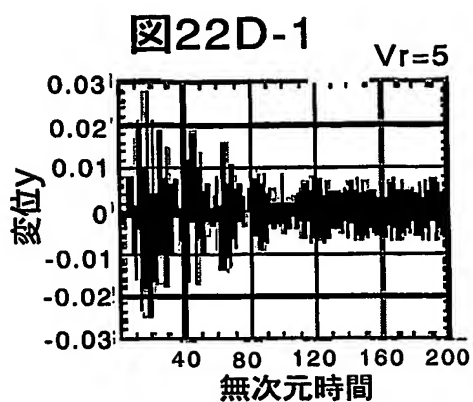
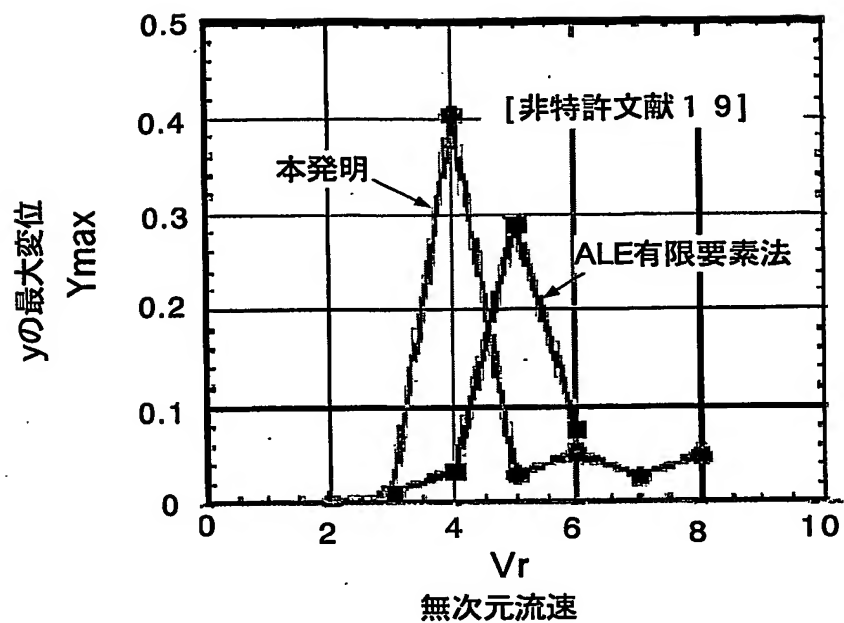




図23



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.  
PCT/JP03/15971

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl<sup>7</sup> G06F17/50

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
Int.Cl<sup>7</sup> G06F17/50

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)  
JSTPLUS FILE (JOIS)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	Yasuaki IKAZUCHI et al., "V-CAD Data o Chokusetsu Riyo suru Nijigen no Nin'i Keijo Nagareba no Suchi Kaiseki", Riken Symposium Ronbunshu, Mono Tsukuri Joho Gijutsu Togoka Kenkyu (Dai 2 Kai), 18 September, 2002 (18.09.02), pages 107 to 120	1-15
A	Masataka KATSUMURA et al., "Chokusetsu Koshi ni Okeru Cut Cell ni Tsuite no Takoshiki Hokan no Hyoka", Dai 16 Kai Suchi Ryutai Rikigaku Symposium Koen Ronbunshu, 16 December, 2002 (16.12.02), page 27	1-15

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:  
 "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance  
 "E" earlier document but published on or after the international filing date  
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)  
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means  
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention  
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone  
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art  
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
13 January, 2004 (13.01.04)

Date of mailing of the international search report  
27 January, 2004 (27.01.04)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

## 国際調査報告

国際出願番号 PCT/JPO3/15971

## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> G06F17/50

## B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> G06F17/50

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

JSTPLUSファイル (JOIS)

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X	雷康斌ほか、V-CADデータを直接利用する二次元の任意形状流れ場の数値解析、理研シンポジウム論文集 ものづくり情報技術統合化研究 (第2回)、2002.09.18、107-120頁	1-15
A	勝村成貴ほか、直交格子におけるカットセルについての多項式補間の評価、第16回数値流体力学シンポジウム講演論文集、2002.12.16、27頁	1-15

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&amp;」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

13.01.04

国際調査報告の発送日

27.1.2004

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

田中 幸雄



5H

9191

電話番号 03-3581-1101 内線 3531